

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI NAPOLI "FEDERICO II"

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Dipartimento Ingegneria Meccanica per l'Energetica

TESI DI

DOTTORATO DI RICERCA

IN

INGEGNERIA DEI SISTEMI MECCANICI

(XVIII CICLO)

**SISTEMI DI POST TRATTAMENTO DEI GAS DI
SCARICO DI MOTORI DIESEL**

COORDINATORE DEL DOTTORATO

Ch.mo Prof. Ing. Raffaele Tuccillo

CANDIDATO

Ing. Immacolata Iaccio

RELATORE:

Ch.mo Prof. Ing. Andrea Unich

CORRELATRICE:

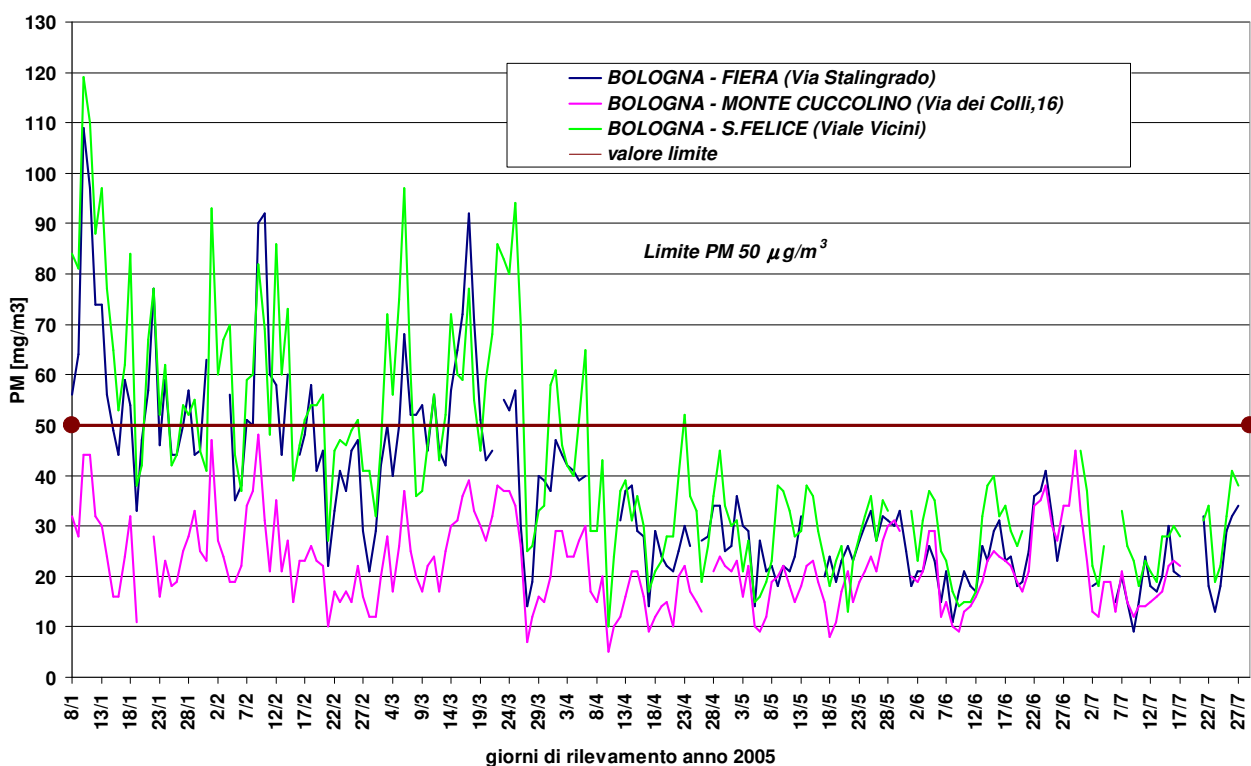
Ing. Maria Vittoria Prati

INDICE

Introduzione	3
1. Emissioni da motori diesel	5
2. Limiti di emissione e cicli di prova	26
3. Sistemi di post-trattamento allo scarico	37
4. Sperimentazione in sala prova	74
5. Sperimentazione su strada	101
6. Conclusioni	137

INTRODUZIONE

Le centraline di monitoraggio dell'inquinamento disposte in alcuni punti delle grandi città rilevano spesso concentrazioni di polveri sottili (particolato) superiori ai limiti, il che costringe le autorità a prendere provvedimenti limitando la circolazione delle auto private. Nella figura sono rappresentati i valori di particolato acquisiti da alcune centraline disposte nella città di Bologna e come si vede il valore limite di $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ è stato più volte superato nell'arco di un anno per cui gli amministratori della città hanno dovuto prendere dei provvedimenti per limitare la presenza in aria di tali concentrazioni.



Il maggiore responsabile della presenza di tale inquinante è il motore diesel e nonostante ci sia stato negli ultimi anni un grande impulso alla ricerca di soluzioni tecniche per ridurre gli ossidi di azoto e il particolato emessi da tali motori, le polveri sottili continuano ad aumentare. Il particolato, specialmente il PM 2,5 (particelle che hanno dimensioni < di $2,5\mu\text{m}$), risulta essere pericoloso per gli alveoli polmonari con conseguenze per la salute. Infatti da studi recenti si è visto che, non solo la quantità emessa di queste particelle è pericolosa, ma anche le dimensioni che queste hanno in quanto quelle di ridotte dimensioni vengono inalate ma sono difficili da espellere.

L'età media del parco circolante di bus e camion è di circa 14 anni e per motivi economici è difficile ridurla. Pertanto una soluzione al contenimento delle emissioni è l'installazione di dispositivi in grado di ridurre l'emissione di particolato dei motori di vecchia generazione.

Di seguito verranno presentati i risultati ottenuti provando un dispositivo in sala prova e su strada. L'attività di ricerca su tali dispositivi si è svolta presso l'Istituto Motori CNR di Napoli sotto la direzione dell'ing. Mario Rapone e dell'ing. Maria Vittoria Prati, con il contributo del Ministero Ambiente e Tutela del Territorio.

L'attività sperimentale è stata suddivisa in due parti fondamentali:

- Prova dei dispositivi su un motore al banco freno;

- Valutazione dei consumi di una flotta di bus circolanti in diverse regioni Italiane;

- Prova dei dispositivi in strada in condizioni reali.

La sperimentazione in sala prova si è svolta su un motore rispondente ai requisiti della direttiva 199/96/CE, rappresentativo del parco circolante di autobus sia per tipologia di motore che per quanto riguarda le ore di moto accumulate. La scelta di tale motore è stata motivata dall'obiettivo di definire un protocollo di prova per la valutazione di dispositivi after market, che su questa classe di veicoli trovano la massima convenienza ed efficacia. Tale dispositivo è stato provato seguendo un ciclo di prove in condizioni stazionarie: 13 modi ESC (European Steady State Cycle) secondo la direttiva 1999/96/CE.

Successivamente con il coinvolgimento di alcune Aziende di trasporto e Aziende per la raccolta dei rifiuti italiane, sono stati monitorati una serie di parametri di 41 mezzi delle Aziende mentre svolgevano normale esercizio in strada. E' stato realizzato un questionario che ogni singola Azienda compilava per ogni mezzo giornalmente e che settimanalmente spediva in Istituto per l'elaborazione. Da tali questionari è stato realizzato un database dal quale sono stati valutati i consumi medi di bus in normale esercizio di linea e successivamente su alcuni di questi bus è stato rilevato il consumo attraverso un opportuno strumento e confrontati i consumi quando su questi era o non era installato il dispositivo.

Per finire, questi dispositivi sono stati testati su strada in tre città italiane mentre svolgevano normale esercizio, monitorando tutta una serie di parametri.

1) EMISSIONI DA MOTORI DIESEL

1.1 INTRODUZIONE

Negli anni con l'avvento delle tecnologie ad un costo più vantaggioso e con l'aumentare della popolazione, i processi di combustione necessari alle attività economiche e sociali sono aumentati vertiginosamente e di conseguenza sono aumentate le sostanze inquinanti in atmosfera. Le attività che utilizzano processi di combustione sono le attività industriali, il riscaldamento e il raffreddamento degli edifici, l'utilizzo dei mezzi di trasporto. Anche in natura avvengono processi di combustione che causano emissioni di sostanze inquinanti come le eruzioni vulcaniche, fuoriuscite di gas dal sottosuolo, incendi, fenomeni di fermentazione di materiale organico, ecc. e non sempre si può evitare che queste sostanze vadano nell'ambiente.

Le emissioni inquinanti sono all'origine di alcuni dei problemi ambientali considerati prioritari ormai in tutte le sedi nazionali e internazionali: cambiamenti climatici, buco dell'ozono nella stratosfera, aumento dell'ozono troposferico, acidificazione del suolo.

Tra le sostanze sotto accusa abbiamo l'anidride carbonica (CO_2), gas a effetto serra che contribuisce di più al riscaldamento della terra e di recente con l'entrata in vigore del Protocollo di Kyoto, anche l'Italia si è impegnata a contenere l'emissione di anidride carbonica. Gli ossidi d'azoto (NO_x), gli ossidi di zolfo (SO_x) e l'ammoniaca (NH_3) sono responsabili delle piogge acide. I composti organici volatili (COV) e gli ossidi di azoto, sono le cause principali dell'inquinamento fotochimico dell'aria. Il monossido di carbonio (CO) che interferisce sull'assorbimento di ossigeno da parte dei globuli rossi, ha un effetto negativo sulla salute umana. Il particolato (PM) oltre a produrre annerimento degli edifici, riduzione della visibilità e irritazioni alle mucose degli occhi e del naso, è cancerogeno ed è quindi estremamente pericoloso per la salute umana.

Le emissioni di CO_2 sono generate dalle attività legate ai trasporti, dalle centrali energetiche e dai processi industriali. I trasporti, le centrali energetiche, i riscaldamenti e gli impianti di combustione industriale producono SO_x e NO_x . Le attività agricole, ed in particolare l'uso eccessivo di fertilizzanti, sono la causa principale della produzione di emissioni di ammoniaca. Nelle città il particolato è generato dal riscaldamento civile e domestico e soprattutto dal traffico veicolare. Infatti il veicolo origina particolato (PM₁₀, PM_{2,5}) non solo bruciando combustibile che, per le caratteristiche chimiche e fisiche che lo contraddistinguono, può essere chiamato anche "aerosol primario", ma anche dall'usura dei pneumatici, dei freni e dall'usura del manto stradale.

Le emissioni di COV sono il risultato di processi di non-combustione, dell'uso di solventi e del traffico stradale. Gli impianti di combustione di attività residenziali, commerciali ed industriali e il traffico veicolare sono invece l'origine delle emissioni di CO.

Nell'Unione Europea e in Italia il 40% del consumo di energia per la mobilità è attribuibile al trasporto urbano che dipende, allo stato attuale per il 95% dal petrolio e da un rapporto ACI del 2004, il totale dei veicoli in Italia con motori a combustione interna si aggirava nel 2003 intorno i 50 milioni. Le autorità legislative, visto che il trasporto urbano è fonte di grande inquinamento impone valori sempre più restrittivi sulle emissioni dei veicoli e se il parco delle autovetture ha un età media di 8 anni, il parco autobus circolante in Italia è passato dai 7,7 anni del 1988 agli attuali 14,4 di età media. L'età media dei bus è alta perché alti sono i costi che le Regioni devono sostenere per la loro sostituzione con bus di tecnologia più avanzata e meno inquinanti. Le Autorità Governative impongono comunque di adottare dei sistemi in grado di ridurre le emissioni di questi bus vecchi e inquinanti in attesa di una loro sostituzione e a livello Nazionale c'è un grosso interesse a trovare dei sistemi aftermarket per abbattere le emissioni inquinanti da adottare sui veicoli esistenti, senza che questi vadano ad inficiare le prestazioni motoristiche dei propulsori e che non richiedano elevati costi per l'applicabilità e la manutenzione successiva. Per aftermarket s'intende qualunque dispositivo, combustibile o additivo applicati o introdotti al motore dopo che questo è uscito dalla fabbrica.

Di seguito una descrizione degli inquinanti emessi dai motori diesel.

1.2 EMISSIONI INQUINANTI

Il motore diesel, come tutti i motori a combustione interna, converte l'energia chimica del combustibile in energia meccanica. Il combustibile tradizionale del motore diesel è il gasolio: una miscela di idrocarburi che teoricamente dovrebbero produrre durante la combustione solo anidride carbonica (CO_2) e vapore d'acqua (H_2O) le cui concentrazioni dipendono dalla tipologia del motore, dal rapporto aria-combustibile e variano nei seguenti range:

CO_2 tra 2 – 12%

H_2O tra 2 – 12%

O_2 tra 3 – 17%

N_2 valori di equilibrio

In un processo di combustione reale, il motore produce sostanze che possono essere tossiche per gli esseri umani e avere un effetto negativo sull'ambiente; questi processi includono combustione non completa del combustibile, reazioni tra diversi componenti sotto condizioni di temperatura e pressioni elevate, combustione di olio lubrificante, combustione di additivi dell'olio e del lubrificante e combustione dello zolfo contenuto nel gasolio. La concentrazione totale di questi inquinanti nei motori di nuova tecnologia è in genere una piccola frazione percentuale.

Gli inquinanti regolamentati allo scarico dei motori diesel in Europa, in America e in altri paesi sono:

Monossido di carbonio (CO)

Ossidi di azoto (NO_x)

Idrocarburi totali (THC)

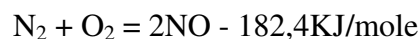
Particolato (PM)

Anche se le quantità dipendono dal tipo di motore e dalle condizioni di funzionamento, gli ordini di grandezza di questi inquinanti per i motori ad accensione comandata e per quelli ad accensione per compressione sono: CO che varia tra 1 e 2% o 200g/kg di combustibile; NO_x che variano tra 500 e 1000ppm o 20 g/kg di combustibile; gli HC oscillano intorno ai 3000ppm (di C₁) o 25 g/kg di combustibile; per i motori diesel invece abbiamo anche il particolato che varia tra 0,2 e 0,5% per massa di gasolio consumato.

Di seguito viene riportata una descrizione degli inquinanti regolamentati e non emessi dal motore diesel.

Ossido di azoto NO_x

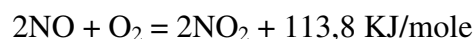
Gli ossidi di azoto che fanno parte degli inquinanti gassosi regolamentati, includono gli NO e gli NO₂. Si formano in camera di combustione, nel fronte di fiamma e nei gas bruciati ad alta temperatura grazie alla reazione di azoto e ossigeno.



Quando durante la fase di espansione i gas di scarico si raffreddano, la concentrazione di ossido di azoto non cambia e resta in eccesso rispetto alla condizione di equilibrio.

Nei motori aspirati il 95% degli ossidi di azoto sono composti da NO e solo il 5% di NO₂, invece nei motori sovralimentati, gli NO₂ crescono intorno al 15%.

L'NO a sua volta può essere facilmente ossidato dall'ossigeno e diventare NO₂ in condizioni ambientali:



La reazione, spontanea ma non immediata, avviene attraverso la diluizione dei gas di scarico in atmosfera. Il diossido di azoto è un gas tossico di colore rosso - grigio e ha un odore irritante, è molto reattivo e ha forti proprietà ossidative.

Accanto al particolato gli NO_x sono gli inquinanti critici dei motori diesel.

Idrocarburi HC

Altro inquinante gassoso del motore diesel sono gli idrocarburi, composti da n atomi di carbonio e m atomi di idrogeno (C_nH_m). Questi sono un miscuglio di idrocarburi che derivano dal combustibile

e dall'olio lubrificante. Gli idrocarburi del combustibile però sono caratterizzati da una catena di carbonio più breve rispetto alla catena di carbonio dell'olio lubrificante che è più pesante.

Si originano in camera di combustione quando la fiamma congela sulle pareti (fenomeno del quenching), quando la fiamma incontra zone in cui c'è un eccesso d'aria tale da non far iniziare la combustione o la fa iniziare ma non la fa completare e vicino l'iniettore alla fine dell'iniezione.

Le normative fissano limiti agli idrocarburi totali nei gas (THC) o agli idrocarburi non metanici (NMHC). Nella categoria degli inquinanti non metanici si esclude la presenza del metano CH₄, vista la scarsa reattività chimica di tale sostanza rispetto agli idrocarburi a catena più lunga.

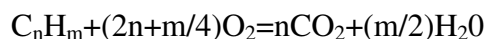
Poiché alcuni standard di emissione considerano i NMHC come inquinante regolamentato, l'EPA (Environmental Protection Agency) ha introdotto un metodo analitico per ottenerli, infatti raccomanda di eliminare il 2% dal valore misurato di THC per ottenere i NMHC. Questa metodologia risulta essere non valida per i motori alimentati a gas naturale.

$$\text{NMHC} = \text{THC} - 2\%\text{THC}$$

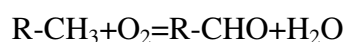
Gli idrocarburi, specie quelli a catena lunga, possono essere irritanti, alcuni di loro come il benzene, sono tossici e cancerogeni. Anche le aldeidi, idrocarburi derivati, hanno un odore che irrita, la formaldeide che ne fa parte è stata classificata cancerogena.

Gli idrocarburi emessi da un motore diesel si dividono in fase gassosa e in fase liquida o assorbita (particolato), però non c'è una chiara distinzione tra le due fasi. Come linea guida, vengono considerati volatili i componenti con una tensione di vapore di 0,1mmHg in condizioni standard (20°C, 760mmHg). La parte volatile degli idrocarburi, che contengono specie aromatiche e alifatiche con un valore approssimato di 24 atomi di carbonio nelle loro molecole, sono gli inquinanti gassosi regolamentati e la loro concentrazione nei gas di scarico dei motori diesel varia tra 20 e 300ppm. La parte non volatile degli idrocarburi fa riferimento alla SOF (frazione solubile organica), descritta nell'argomento del particolato.

Gli idrocarburi possono essere ossidati dall'ossigeno e produrre CO₂ e acqua, questa è una reazione sfruttata nei sistemi di abbattimento delle emissioni.



In condizioni particolari, gli idrocarburi formano anche aldeidi e chetoni.

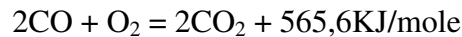


In atmosfera, gli idrocarburi subiscono reazioni fotochimiche con gli NO_x dando luogo a smog e aumento del livello di ozono.

Monossido di carbonio CO

Il monossido di carbonio è un gas tossico inodore e incolore, la cui densità è circa quella dell'aria. Ad alta concentrazione è infiammabile e bruciando produce una fiamma blu luminosa.

Abitualmente l'emissione dai motori diesel è molto bassa e ad elevata temperatura o su un catalizzatore ossidante, il CO può essere ossidato dall'O₂ per formare la CO₂.



La reazione produce calore e nel caso in cui i gas di scarico siano ricchi di CO, questi possono far produrre al catalizzatore ossidante un notevole aumento di temperatura. Un'ossidazione adiabatica dell'1% di CO nel flusso dei gas di scarico, fa aumentare la temperatura di circa 100°C.

E' prodotto in camera di combustione e il processo di ossidazione continua fino a che durante la fase di espansione, la temperatura dei gas di scarico scende sotto un certo valore.

Diossido di zolfo SO₂

Il diossido di zolfo è un gas originato dallo zolfo contenuto nel combustibile e nell'olio lubrificante. Questo gas incolore con caratteristiche irritanti, può essere ossidato a SO₃ che è il precursore dell'acido solforico responsabile del solfato nel particolato. La maggioranza dello zolfo nei gas di scarico, esiste come SO₂, solo il 2-4% di zolfo nel combustibile viene emesso come SO₃ dal motore. La concentrazione di SO₂ può essere calcolata dal consumo di combustibile e dal suo tenore di zolfo, infatti facendo alcuni calcoli, se il rapporto aria combustibile è 20, tipico valore per un diesel che opera a pieno carico con un valore di consumo di 225 g/kWh, si può notare dal grafico che un combustibile con 500 ppm di S produce circa 20 ppm di SO₂. Quando il livello di zolfo nel combustibile decresce, diventa importante per l'SO₂ lo zolfo contenuto nell'olio lubrificante. Di solito l'olio lubrificante contiene 4-10 ppm di zolfo dovuti alla presenza degli additivi.

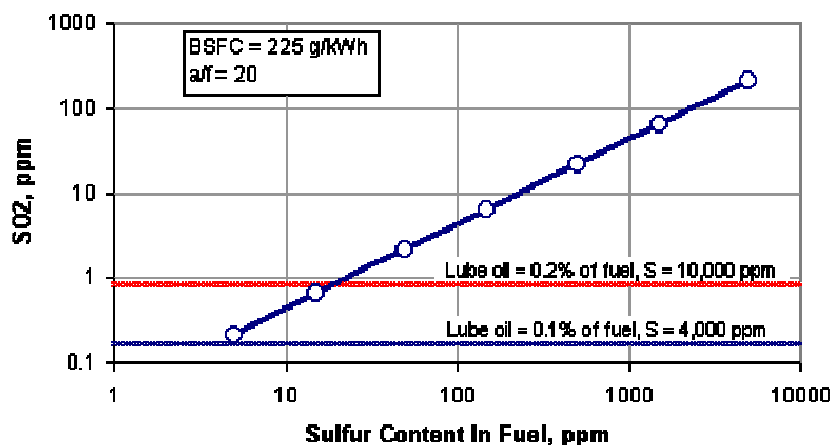


Figura 1.1: Emissione di SO₂ in funzione del contenuto di zolfo del combustibile

La quantità di consumo di olio, in letteratura si dice che è circa lo 0,075% di combustibile, in condizioni reali, oscilla tra 0,1 e 0,2% di combustibile. Delle due linee orizzontali, quella più bassa che corrisponde al consumo di olio di 0,1% di combustibile il cui contenuto di S è di 4ppm, produce SO₂ confrontabile a quello associato a un combustibile di 5ppm di zolfo.

Lo zolfo nel combustibile è anche responsabile del particolato dovuto ai solfati, infatti con un alto valore di zolfo 0,25% di S nel combustibile, si genera un 0,067 g/kWh di particolato da solfati. Dispositivi catalitici, catalizzatori ossidanti o filtri per particolato catalizzati possono convertire SO₂ in SO₃ e successivamente incrementare il particolato.

Ossido Nitroso N₂O

L'ossido nitroso è anche conosciuto come il gas esilarante, ha un odore dolce con caratteristiche narcotiche per l'uomo. Ha un notevole impatto ambientale per le conseguenze sull'effetto serra, così come l'attacco allo strato di ozono.

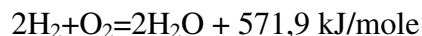
E' tra i gas non regolamentati anche se chimicamente è un ossido di azoto, l'ossido nitroso è stato escluso dagli ossidi di azoto regolamentati NO_x. Un motore diesel produce circa 3ppm contro i 12-35ppm di una macchina a benzina equipaggiata con un catalizzatore a 3 vie.

Alcuni sistemi di controllo dei gas di scarico possono far incrementare i valori di N₂O, però c'è una notevole attenzione da parte dei produttori di tali dispositivi a mantenere basso i valori di questo gas.

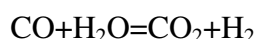
Idrogeno H₂

L'idrogeno è un gas incolore, non ha un diretto impatto ambientale o effetti sulla salute degli uomini, ma ha un ruolo nelle reazioni nei sistemi di controllo dei catalizzatori e in alcuni catalizzatori.

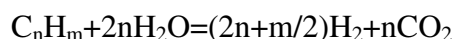
Normalmente in condizioni di funzionamento magro, l'idrogeno non è presente nei gas di scarico dei diesel. La reattività chimica dell'idrogeno cresce al crescere della temperatura, infatti se questa reazione è estremamente lenta a temperatura ambiente, cresce notevolmente quando il gas viene riscaldato a 180°C diventando esplosivo con un ulteriore riscaldamento a 450°C.



L'idrogeno può essere generato nei catalizzatori come reazione del vapore d'acqua e il monossido di carbonio:



e dalla reazione del vapore d'acqua con gli idrocarburi:



Non esiste in letteratura informazioni sull'idrogeno nei gas di scarico dei diesel o a valle dei sistemi di controllo dei gas di scarico.

Particolato PM

Il particolato (PM o DPM), forse il più importante a livello di emissione, è responsabile del fumo nero che tradizionalmente associamo ai veicoli alimentati a gasolio. Nonostante ci siano tante ricerche, ne' la formazione di PM nel cilindro motore, ne' le sue proprietà chimico fisiche o effetti sulla salute umana sono completamente conosciuti. Tuttavia, sulla base di quello che già si conosce, il PM è percepito come il più dannoso prodotto dei motori diesel, è regolamentato in tutto il mondo e insieme agli NO_x è oggetto di attenzione dei produttori di tecnologie per il controllo delle emissioni.

La composizione del particolato carbonioso è influenzata da come esso viene campionato. Le condizioni fisiche sotto cui la misura del particolato è fatto, sono critiche perché le specie emesse sono instabili e possono alterarsi; le distribuzioni di misure delle particelle cambiano (attraverso delle collisioni), le particelle subiscono delle interazioni chimiche con altre specie chimiche presenti nel gas di scarico e alcune volte durante lo stesso processo di misura.

In Europa si sta cercando di sviluppare un metodo di misura basato sul numero di particelle emesse, piuttosto che la massa, da includere in futuro all'emissione standard di PM come massa.

Il metodo usato in molti laboratori, come specificato dalle procedure dell'EPA (Environmental Protection Agency) e da procedure standard in molti paesi, è quello di campionare il particolato sul filtro dopo averlo diluito con aria pulita e raffreddato alla temperatura max di 52°C. I dispositivi usati in laboratori per fare questa diluizione dei gas di scarico, sono conosciuti come tunnel di diluizione. Con questa procedura si simula la condizione cui si viene a trovare il particolato diesel che uscendo dal veicolo, si diluisce con l'aria ambiente. I filtri di fibra di vetro che sono usati per campionare il PM, catturano le particelle solide così come goccioline liquide, o miste che condensano dai gas di scarico durante il processo di diluizione. Poiché i rapporti di diluizione atmosferici di PM (circa 500-1000) sono molto più alti di quelli usati nei tunnel di diluizione dei laboratori, la simulazione della diluizione atmosferica è lontana dalla realtà.

Altri strumenti usati per la misura come concentrazione di massa del particolato, sono l'opacimetro che misura la quantità relativa di luce che passa attraverso i gas di scarico e il fumimetro che misura la luce riflessa da un raggio che incide sul particolato raccolto su un nastro di carta. Queste due tecniche che non misurano direttamente la massa del particolato, determinano l'emissione di fumo visibile, dando un'indicazione della massa emessa e per i motori diesel leggeri e pesanti, la prova in accelerata libera è regolamentata.

Il particolato ha una distribuzione di misura bimodale, sono un mix di particelle emesse nella modalità di nucleazione e di accumulazione.

Le particelle “nuclei” sono molto piccole, il loro diametro va tra 0,007 a 0,04 micrometri. Studi recenti ridefiniscono il nucleo come particelle che sono ancora più piccole 0,003 a 0,03 micrometri, facendo il confronto con alcune molecole più grandi.

La forma delle particelle non è generalmente sferica ma irregolare, la classificazione granulometrica del particolato richiede che sia definita una grandezza geometrica caratteristica che rappresenti la dimensione media di ogni singola particella. Questa grandezza geometrica prende il nome di diametro equivalente, ossia il diametro di una particella sferica che esibisce un comportamento dinamico (velocità, traiettoria) simile sotto l'azione di una forza elettrostatica, centrifuga e gravitazionale. A secondo dell'apparecchiatura utilizzata per misurare la granulometria, una particella non sferica può essere caratterizzata con diametri equivalenti: diametro geometrico, diametro aerodinamico, diametro di mobilità elettrica.

La natura delle particelle “nuclei” si sta ancora studiando in laboratorio. E' risaputo che le particelle nucleo sono particelle volatili formate da idrocarburi e acido solforico condensato che si sono formati dai precursori gassosi quando la temperatura decresce nel condotto di scarico e dopo il mescolamento con l'aria fredda che si ha in laboratorio o con l'aria ambiente. Queste particelle volatili sono molto instabile; la loro concentrazione dipende fortemente dalle condizioni di diluizione, dalla quantità di diluizione e tal tempo di residenza nel condotto. Una piccola quantità di tali particelle possono essere formate da particelle solide, di carbone, o cenere metallica dagli additivi degli oli lubrificanti. Le particelle in modo nucleo che sono la maggioranza, circa il 90%, sono una piccola parte della massa di PM.

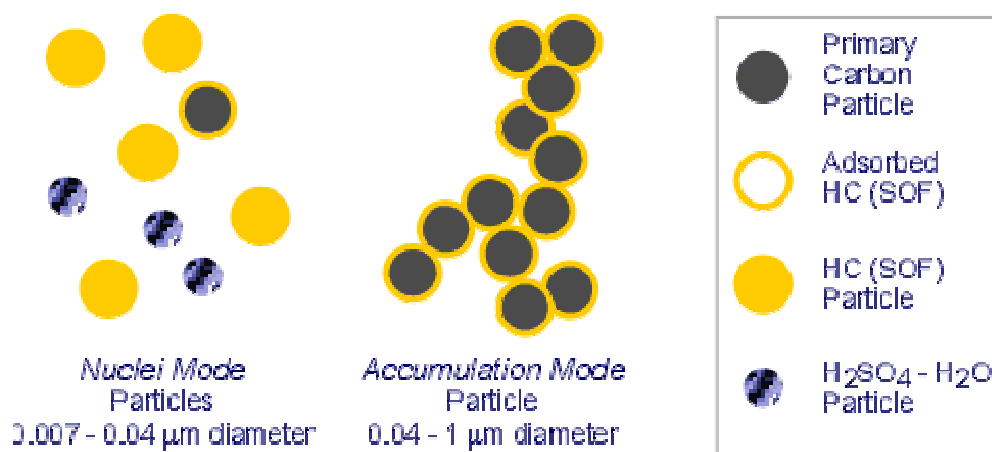


Figura 1.2: Composizione del particolato diesel

Le particelle in modo accumulazione sono formate da agglomerati di particelle di carbone e altro materiale solido, accompagnato da gas assorbiti e vapori condensati. Esse sono composte principalmente da carbone solido e da idrocarburi condensati pesanti, ma possono anche includere composti di zolfo, ceneri metalliche, metalli dovuti all'usura, etc. Il diametro delle particelle in modo accumulazione è compreso tra 0,04 e 1 micrometro con una massima concentrazione tra 0,1 e 0,2 micrometri. La maggiore massa di particolato emesso è composta da particelle agglomerate, ma sono solo una piccola quantità del totale delle particelle intese come numero.

Composizione del particolato diesel

Il PM è tradizionalmente diviso in tre frazioni che possono essere inoltre suddivise come segue:

1. Frazione solida (SOL)

Matrice carboniosa

Ceneri (metalli)

2. Frazione solubile organica (SOF)

Materiale organico derivato da olio lubrificante del motore

Materiale organico derivato dal combustibile

3. Particolato dai solfati (SO₄)

Acido solforico

Acqua

In accordo con questa classificazione, il totale del particolato (TPM) può essere definito come:

$$\text{TPM} = \text{SOL} + \text{SOF} + \text{SO}_4$$

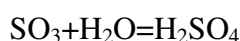
Le particelle che lasciano il motore sono composti formati principalmente in fase solida (SOL). Le particelle che lasciano la camera di combustione possono essere nucleo o agglomerati di particelle e nel condotto di scarico, in dipendenza dalla temperatura, le particelle subiscono una limitata ossidazione e un'ulteriore fase di agglomerazione. Alcune di queste si depositano sulle pareti del tubo di scarico, per effetto del gradiente di temperatura.

Altri precursori del particolato sono gli idrocarburi, ossidi di zolfo e acqua e vapori presenti nel tubo di scarico caldo.

Un'altra sorgente di materiale solido nei gas di scarico sono le ceneri metalliche, componenti derivati dagli additivi degli oli lubrificanti, così come dall'usura del motore. La nucleazione dovuta alla cenere volatile si pensa si formi durante la fase di espansione nel cilindro del motore. Il nucleo di cenere può agglomerarsi e formare particelle in fase di accumulazione. In proporzione la cenere nei nuovi motori sta crescendo, vista la minore presenza di particolato carbone e quindi una minore massa PM.

Le proprietà chimico fisiche del particolato cambiano quando il gas di scarico entra nel tunnel di diluizione, si mescola con l'aria e viene raffreddato sotto i 52°C. Gli idrocarburi pesanti, che sono derivati dall'olio lubrificante e dal combustibile non bruciato, condensano e sono assorbiti sulla superficie delle particelle di carbone formando la parte organica del PM (SOF). Se la quantità di particelle di carbone che possono fare da spugna per gli idrocarburi è insufficiente, allora questi si raccoglieranno formando un incremento della parte volatile (liquida) delle particelle in modo nucleo. Nel tunnel di diluizione, il totale degli idrocarburi della camera di combustione, vengono divisi fra particolato (SOF) e fase gassosa degli idrocarburi (almeno in teoria; in pratica una parte degli idrocarburi dello scarico può essere misurato e giustificato due volte: nella fase di particolato e nella fase gassosa).

L'acido solforico nei gas di scarico dei motori diesel è derivato dal contenuto di zolfo. Come abbiamo detto circa il 5% del contenuto di zolfo nel combustibile, lascia la camera di combustione sotto forma di SO₃ e in presenza di acqua reagisce per produrre acido solforico:



Il particolato dei solfati sono formati nel tunnel di diluizione attraverso un processo di eteronucleazione dalle molecole di H₂SO₄ e acqua e si deposita sul filtro insieme al materiale carbonioso durante la misura della massa di PM. Si è visto che il particolato da solfati, esistendo nella fase di accumulazione e mescolata con carbone e materiale SOF organico, sono anche un'importante sorgente di particelle in fase nucleo (H₂SO₄-H₂O).

La composizione del PM varia molto a secondo della tecnologia del motore, del tipo di prova e, nel caso del particolato dai solfati, dal contenuto di zolfo nel combustibile. Un esempio di composizione di PM da un motore diesel heavy-duty è illustrato in figura.

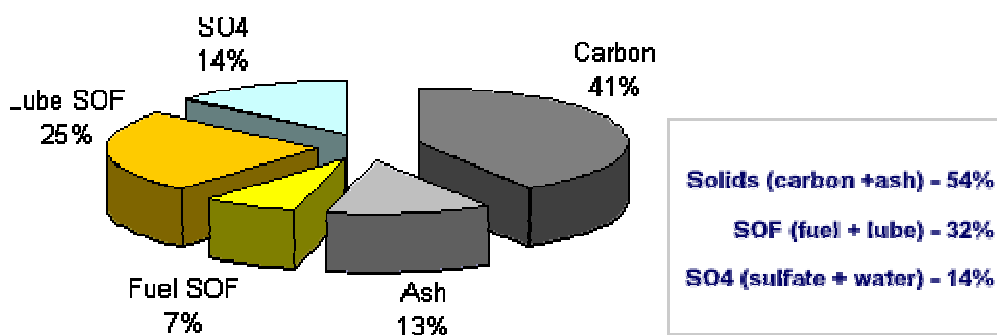


Figura 1.3: Composizione del particolato per un motore diesel HD.

Il particolato diesel include come parte del SOF, altre classi di idrocarburi pesanti o idrocarburi derivati, materiale di speciale interesse, per esempio gli idrocarburi policiclici aromatici (PAH) o le diossine. La concentrazione di queste sostanze sono basse in confronto al PM, che diventano

invisibili se le si mette a confronto con gli altri inquinanti, però hanno un'elevata attività biologica allo stato puro e la presenza di pochi di questi componenti nei gas di scarico, preoccupano.

Frazione solida

Carbone

La frazione solida del particolato diesel è composta principalmente da carbonio, alcune volte riferita anche come “carbone inorganico”. Questo carbonio, chimicamente non lega con altri elementi, è chiamato carbone nero o soot-fuliggine, sostanza responsabile del fumo nero delle emissioni. La frazione carboniosa del PM risulta dal processo di combustione eterogeneo nel motore diesel, dove i precursori delle particelle solide sono formate nella fiamma premiscelata e diffusiva. Gli atomi di carbonio (il soot delle particelle) che hanno una struttura esagonale, si mettono insieme formando una struttura platelet-like. Questi platelets si raggruppano in strati, da due a cinque e vanno a formare cristalliti di grafite a forma di foglie. Le cristalliti sono impacchettati in modo casuale con i

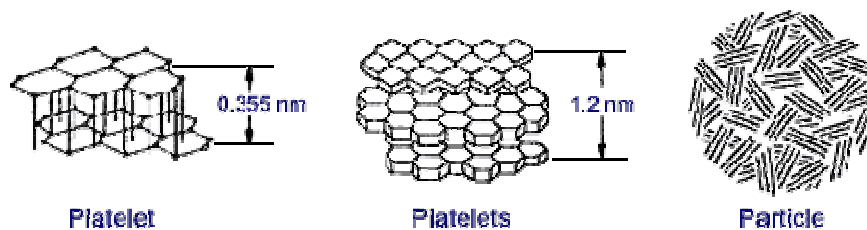


Figura 1.4: Strutture primarie delle particelle carboniose.

loro piani generalmente paralleli alla faccia della particella principale (per esempio modo nucleo). Le principali particelle agglomerate presenti nel cilindro, viaggiano attraverso il sistema di scarico e vengono poi scaricati nell'atmosfera. La struttura di un agglomerato diesel è mostrato nella figura 6 grazie a un microscopio (Transmission Electron Microscope). La particella singola dell'agglomerato è formata da numerosi cristalliti di grafite, pochi nanometri in misura che formano una struttura a cipolla come in figura 5.

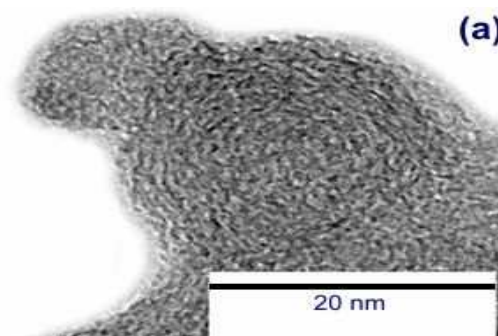


Figura 1.5: Struttura di una particella con microscopio TEM.

Dalla figura 6 invece si nota l'organizzazione delle particelle che formano una struttura a grappolo formata da centinaia di particelle a forma di nucleo. Queste particelle, che con buona approssimazione sono di forma sferica, quando formano l'agglomerato, sono molto lontano dall'essere sferiche. L'agglomerato di particelle spesso formano una catena di non ben definito diametro, questo fa sì che sia difficile avere una misura precisa delle particelle, il cui diametro varia a seconda del principio di misura utilizzato.

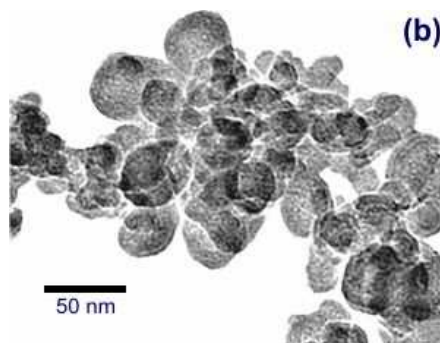


Figura 1.6: Struttura di un agglomerato di particelle con microscopio TEM

Ceneri

Un altro componente della frazione solida del PM è la cenere metallica. Nei nuovi motori si produce meno particolato carbonioso, ma riveste una certa importanza il crescere dell'emissione del particolato non carbonioso. Da uno studio fatto su motori heavy-duty diesel americani costruiti dopo il 1994, si nota la presenza di più del 10% di cenere, valore che aumenta con i motori più nuovi.

L'emissione di cenere, riceve molta attenzione per chi produce filtri per particolato, che devono resistere a componenti corrosivi di cenere. In generale la cenere dei diesel contiene:

Solfati, fosfati, ossidi di calcio (Ca), zinco (Zn), magnesio (Mg) e altri metalli che si sono formati in camera di combustione bruciando gli additivi degli oli lubrificanti. Queste sostanze chimiche sono presenti negli oli come detergenti, dispersanti, acidi neutralizzatori, antiossidanti, inibitori della corrosione, antiusura etc. La quantità di cenere prodotta dall'olio dipende dal contenuto di cenere nell'olio (1,5% circa) e dal suo consumo che è di circa 0,1-0,2% del consumo di combustibile.

Le impurità di ossidi metallici risultanti dall'usura dei motori, che sono portati dentro la camera di combustione dall'olio. Questi includono: ferro, rame, cromo e alluminio.

Ossidi di ferro dovuti alla corrosione del sistema scarico. Gli ossidi che si ritrovano dipendono dal tipo di metallo che costituiscono i condotti, per cui si possono trovare anche cromo, nichel e alluminio.

Inoltre gli additivi metallici dei combustibili sono usati per facilitare la rigenerazione dei filtri di particolato, quindi i gas di scarico conterranno le ceneri degli ossidi includendo cerio, ferro e stronzio. Gli additivi metallici possono far nascere un elevato numero di particelle in modo nucleo.

Frazione organica solubile

Sono gli idrocarburi assorbiti sulla superficie delle particelle di carbone e/o presenti sotto forma di fine goccioline formando la frazione solubile organica (SOF) del particolato diesel. L'aggettivo solubile deriva dalla tecnica utilizzata che utilizza solventi per isolare la frazione organica del particolato. Alcune volte questa frazione è anche riferita come VOF (frazione organica volatile), misurata dall'evaporazione sotto vuoto, ma è comunque legata al SOF.

La frazione SOF viene dal liquido solo dopo il raffreddamento sotto i 52°C in laboratorio in un tunnel di diluizione. Alla temperatura dei gas di scarico, molti dei componenti SOF esistono come fase vapore, specialmente ad alto carico e quindi ad alta temperatura. Questa trasformazione del SOF è da ricordare per capire i cambiamenti che accadono al particolato in alcuni dispositivi aftermarket come catalizzatori ossidanti o filtri di particolato.

La quantità di SOF nel totale di PM, varia tra motore e motore. Particolato con basso contenuto di SOF, sono chiamati particolati secchi. Quelli ad alto contenuto di SOF sono chiamati particolati umidi. Nei particolati umidi la frazione organica può essere costituire il 50% del totale di PM, sotto forma di idrocarburi assorbiti sulla superficie delle particelle. Nel particolato secco, il SOF contenuto, può essere meno del 10%. Solitamente il SOF è più alto quando il carico è basso e le temperature in camera di combustione sono basse, quindi non avviene una completa combustione dell'olio che entra in camera di combustione. In figura 7 sono illustrate con cerchi il totale di PM e la torta interna al cerchio indica il contenuto di SOF e la parte solida + SO₄ in alcune condizioni di funzionamento stazionarie di un motore turbo diesel di 2,8 litri.

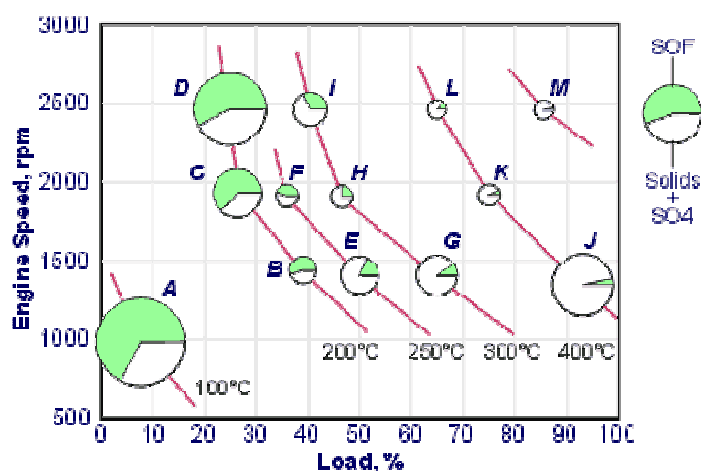


Figura 1.7: Composizione del particolato in differenti condizioni di funzionamento.

Il motore due tempi ha un più alto valore di SOF rispetto a quello 4 tempi. Le fluttuazioni di SOF, in relazione alla tecnologia del motore e in relazione al ciclo di prova, può influenzare lo sviluppo di alcuni dispositivi per il controllo del particolato, poiché queste particelle si comportano diversamente nei catalizzatori ossidanti e nei filtri di particolato.

Idrocarburi policiclici aromatici

La frazione SOF dei gas di scarico contiene molti dei policiclici aromatici (PAH) e nitro-PAHs. I PAHs sono idrocarburi aromatici con due o più (5 o 6) anelli di benzene uniti in più o meno classi di forme. Questi preoccupano molto per le loro caratteristiche mutevoli e in alcuni casi con caratteristiche cancerogene. Rispetto agli anni 80, in cui c'erano moltissime pubblicazioni in merito, oggi ci sono meno ricerche sui PAHs. Comunque questi componenti sono ancora studiati dalle agenzie di controllo della qualità dell'aria e in USA l'EPA la definisce come aria tossica.

L'EPA introduce il termine Materia Policiclica Organica (POM), definiti come una classe di componenti dell'aria tossici con più di un anello di benzene e un punto di ebollizione di 100°C e più. Il POM visto come classe è alquanto identica ai componenti del PAH; ha un gruppo di sette idrocarburi policiclici aromatici, tutti identificati come probabili responsabili del carcinoma umano e spesso sono usati dall'EPA come surrogati dell'intero gruppo dei POM.

I PAHs sono divisi in fase gas e in fase di particolato. I componenti più dannosi dei quattro o più anelli possono essere trovati quasi esclusivamente nella frazione organica (SOF) del particolato.

I PAHs sono presenti nel combustibile diesel, con una concentrazione tra 1,5 e 2,5%. Alcuni di loro, 0,2 –1% del totale presente nel combustibile, sopravvivono alla combustione e quindi trovati nel gas di scarico. Un altro fenomeno che accade nel motore è la formazione dei nitroderivati dei PAHs dovuto all'alta concentrazione di NO_x .

Particolato da solfati

Il particolato da solfati sono composti principalmente da acido solforico idratato e sono maggiormente liquidi. L'acido e l'acqua in fase vapore producono nuclei di molecole, che poi crescono in una forma più stabile di nucleo quando si trovano nel rapporto 8:3 di acqua e acido solforico. Si pensa che le particelle di solfato come particolato sono separate dal carbone e sono presenti nei gas di scarico come particelle in forma di nucleo.

La formazione di particelle nel tunnel di diluizione dipende dalla pressione del vapore d'acqua e dall'acido e sono funzione anche:

Livello di zolfo nel combustibile;

Conversione di zolfo del combustibile a SO_3 ;

Rapporto aria /fuel;

Temperatura del tunnel di diluizione;

Umidità relativa del tunnel di diluizione.

La variabilità di campionamento può essere così minimizzata mantenendo una costante umidità relativa e usando un costante livello di zolfo nel combustibile. Dovrebbe essere notato il campionamento oggi non ha alcuna procedura che richiede di mantenere costante l'umidità dell'aria di diluizione, mentre secondo la teoria dell'eteronucleazione, la quantità di solfato particolato nucleato dipende fortemente da quel parametro.

Oltre all'acido solforico, il particolato da solfati può anche includere sali di solfato. La maggior quantità di sali è il solfato di calcio CaSO_4 che si può formare dalla reazione dell'acido solforico e calcio che deriva dagli additivi dell'olio lubrificante. Vari solfati possono essere prodotti dalla reazione dell'acido solforico e dai componenti del condotto di scarico.

Come detto prima, il TPM è determinato pesando il totale di massa posta sul filtro di campionamento, di conseguenza, l'acido solforico, i sali dei solfati e l'acqua combinata sono tutti TPM. L'esatta quantità di acqua che è combinata con l'acido solforico cambia in funzione del grado di umidità e della temperatura. Poiché i filtri di campionamento sono preconditionati al 50% di umidità e a 25°C, dal diagramma di figura 8, si può ricavare la quantità di acido che in queste condizioni si combina con l'acqua.

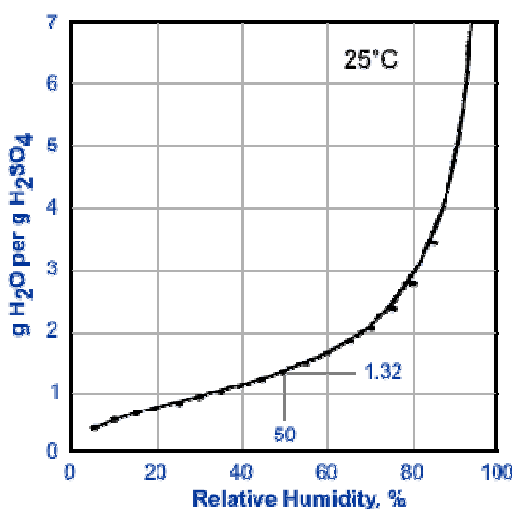


Figura 1.8: Andamento dell'acido solforico in funzione dell'umidità.

1.3 INFLUENZA DEI PARAMETRI MOTORISTICI SULLE EMISSIONI

Le variabili motoristiche che hanno un notevole effetto sulle emissioni dei motori diesel sono il rapporto aria combustibile, l'interazione spray-aria, l'anticipo e il tempo d'iniezione, il rapporto di compressione e la temperatura e composizione della carica nel cilindro.

Rapporto aria - combustibile

Nei motori diesel il combustibile sotto forma di minuscole goccioline e l'aria devono mescolarsi in tempi molto brevi, quindi è necessario un notevole eccesso d'aria perché la combustione avvenga in modo completo. Questi operano lontano dai rapporti stechiometrici (λ è maggiore di 1). Il valore minimo è circa 1,2-1,3, questa quantità è anche conosciuta come il limite di fumo, infatti il fumo del motore cresce drammaticamente quando questo rapporto aria combustibile scende sotto questo valore. Per una data quantità di aria nel cilindro, il limite di fumo stabilisce la massima quantità di combustibile che può essere iniettato per ciclo e quindi la massima potenza che il motore può dare all'asse.

Nella figura 9 che segue si mette in evidenza la relazione tra rapporto aria combustibile ed emissioni del motore. Ad un valore molto alto del rapporto di aria combustibile (corrispondente ad un basso carico), la temperatura nel cilindro dopo la combustione è bassa per bruciare gli idrocarburi residui e la frazione organica solubile del particolato è alto. Ad una minore quantità del rapporto aria combustibile, meno ossigeno è disponibile per l'ossidazione del soot che quindi cresce. Quando il λ resta su 1,6 questo incremento cresce in modo relativamente più graduale, ma se si scende sotto questo valore di 1,5 c'è un incremento che non è più lineare.

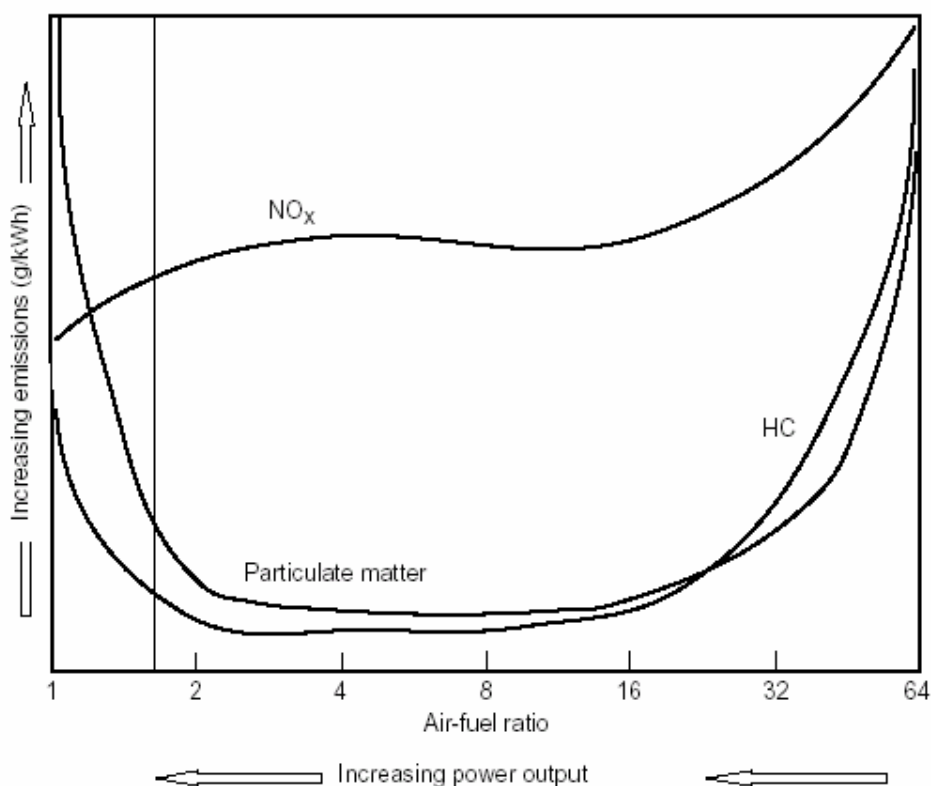


Figura 1.9: Relazione tra rapporto aria-combustibile e emissioni per un motore diesel.

Nei motori aspirati, la quantità di aria nel cilindro è indipendente dalla potenza all'asse. La massima potenza per questi motori, è normalmente legata al fumo che questi emettono: è un compromesso

tra fumo e potenza. Quasi in tutti i paesi, il fumo emesso dai motori diesel è regolamentato attraverso il limite di opacità che non deve essere superato nella prova di verifica per l'omologazione del veicolo e nei successivi controlli periodici.

Nei motori turbocompressi, un incremento della quantità di combustibile iniettato per ciclo, incrementa la portata dei gas di scarico e il loro contenuto entalpico, il che aumenta la velocità della turbina del motore facendo elaborare più aria al compressore e al motore. Per questa ragione, i motori turbocompressi non sono limitati nella potenza dal fumo, ma sono limitati dal design dei condotti, dalla velocità della turbina e dai carichi termici e meccanici dei componenti del motore.

I motori turbocompressi in condizioni stazionarie, non sono utilizzati con bassi rapporti aria combustibile e comunque tendono a emettere poco fumo anche in condizioni di piena potenza. Bassi rapporti di aria combustibile si hanno quando si lavora in transitorio, poiché la turbina con la sua inerzia non riesce a rispondere istantaneamente ad un incremento di potenza, con una maggiore quantità d'aria in camera di combustione. Se non si riduce la quantità di combustibile, rispetto a quello richiesto, il rapporto aria combustibile scende sotto un certo valore e quindi il motore emetterà un denso fumo nero, problema che si verifica nel traffico urbano. Questo potrebbe essere risolto aggiungendo un acceleratore limitatore di fumo, infatti questo dispositivo modula il flusso di combustibile in camera di combustione, attraverso l'incremento di pressione, per seguire il tempo di risposta del turbocompressore.

Il limitatore di fumo deve essere un compromesso tra bassa emissione di fumo e performance del motore. Come abbiamo detto in molti paesi l'accelerazione è regolamentata, infatti la normativa ECE R24 limita il valore di opacità nelle libere accelerazioni.

I motori turbocompressi senza limitatori per contenere il fumo, sono più inquinanti di quelli aspirati, infatti facendo dei test di opacità secondo il regolamento R24 su 254 autobus londinesi della London Buses Limited (LBL), si è visto che il 68% degli autobus aspirati passavano il test contro il 36% di quelli turbocompressi. Però quando i turbocompressi sono controllati periodicamente, i valori di emissione sono inferiori di quelli aspirati di simile potenza.

I valori di emissione sempre più restrittivi in USA ha portato ad eliminare dal servizio dei trasporti urbani, bus con motori aspirati e lo stesso trend si è verificato in Europa con l'avvento di limiti di emissione sempre più restrittivi. L'alta efficienza dei turbocompressori a geometria variabile (VGT) e il raffreddamento della carica di aria che conduce ad un aumento della densità della carica in camera di combustione etc. porta ad avere una riduzione del PM sotto molti punti di funzionamento del motore.

Miscelazione aria combustibile

La miscelazione tra l'aria ed il combustibile nel cilindro del motore, è un importante fattore che determina le emissioni. La quantità mescolata durante il tempo di ritardo di accensione determina quanto combustibile brucia nella primissima fase della combustione: più alta è la quantità mescolata, maggiore è la quantità di combustibile che brucia nella primissima fase con un aumento del rumore, degli ossidi di NO_x e con valori più bassi di PM. Nella fase successiva di combustione diffusiva, la combustione è limitata dalla quantità di gasolio iniettata.

Chi disegna il motore deve bilanciare tra il rapido e completo mescolamento per avere minore soot, migliore economia del combustibile e un mescolamento tale da non incrementare gli NO_x .

Il primo fattore riguardante la quantità mescolata è la pressione di iniezione, il numero e diametro dei fori dell'iniettore, il moto di swirl dato all'aria quando entra in camera durante l'immissione e il moto dell'aria generata in camera di combustione quando questa viene compressa.

Elevata turbocompressione, swirl dell'aria in funzione della velocità del motore e pressione di iniezione sono importanti per avere un migliore controllo delle emissioni.

Tempo di iniezione e fase di combustione

La relazione tra inizio dell'iniezione e la pressione max del ciclo ha un importante effetto sulle emissioni e sul consumo di combustibile. Per l'economia dei consumi è preferibile che la combustione inizi piuttosto prima del punto morto superiore. Visto che c'è un tempo finito tra inizio iniezione e inizio fase di combustione, è necessario iniettare il combustibile qualche grado $5-15^\circ$ prima del punto morto superiore. Più si anticipa l'iniezione, meno calda sarà l'aria in camera di combustione e maggiore sarà il tempo di ritardo all'auto accensione. Questo farà sì che il combustibile e l'aria si mescoleranno meglio e aumenterà la quantità di miscela che si brucerà in prossimità del punto morto superiore, incrementando pressione e temperatura nel cilindro e facendo aumentare gli NO_x . Dall'altro lato l'anticipo dell'iniezione tende a ridurre il PM e ad emettere meno idrocarburi a basso carico. Il combustibile bruciando nella fase di combustione premiscelata forma un po' di soot il quale nella successiva fase di combustione diffusiva vicino il punto morto superiore, si trova da un lungo periodo di tempo ad alta temperatura, con elevato mescolamento e quindi sarà più facilmente ossidato. Il tempo di fine iniezione ha un effetto sull'emissione di soot: il combustibile iniettato dopo il punto morto superiore si troverà ad una più bassa temperatura, quindi brucerà più lentamente e meno soot avrà il tempo di essere ossidato durante il ciclo. Per una determinata pressione di iniezione, misura dei fori di iniezione e quantità di combustibile, il tempo della fine di iniezione è determinata dal tempo di inizio iniezione.

Il risultato di questi effetti è che il tempo di iniezione deve essere un compromesso tra PM e economia dei consumi e dall'altro lato rumore, emissioni di NO_x e massima pressione nel cilindro.

Il compromesso può essere trovato aumentando la pressione di iniezione la quale migliora il mescolamento e anticipa la fine del tempo dell'iniezione. Un'altra possibilità è quella già adottata delle multi iniezioni, cioè una piccola quantità è iniettata anticipatamente per far bruciare il corpo principale della quantità di combustibile vicino al PMS.

Confrontando un motore non controllato con uno moderno con sistemi di controllo delle emissioni, si vede che si è ritardata l'iniezione, aumentato le pressioni per limitare l'effetto sul PM e sui consumi. La risposta del consumo e del PM in relazione al tempo di ritardo non è lineare, infatti su un tratto l'effetto è relativamente piccolo, ma oltre quel tratto il deterioramento è elevato. Cambiare anche di un grado l'angolo di anticipo, fa cambiare di molto le emissioni. Il tempo di iniezione migliore per un motore dipende dal design del motore, dalla velocità e carico del motore e dalla severità degli standard di emissione per i diversi inquinanti.

Temperatura della carica

Comprimendo l'aria con il compressore della turbina, si aumenta la sua temperatura e la sua densità diminuisce per cui una minore massa di aria andrebbe nella camera di combustione. Invece se riduciamo la temperatura di quest'aria abbiamo dei benefici sia per gli NO_x che per il PM, infatti riduciamo la temperatura della fiamma durante la combustione e quindi aiutiamo a ridurre gli NO_x e in più aumentando la massa di aria che entra in camera aumenta il rapporto aria combustibile e quindi il soot delle emissioni. La temperatura inferiore dell'aria fa anche diminuire la temperatura del pistone e questo ci permette di poter aumentare la potenza del motore visto che miglioriamo il problema del limite termico del motore. Se si spinge a raffreddare molto l'aria, si riduce la temperatura degli idrocarburi e questo fa incrementare l'emissione degli idrocarburi a basso carico annullando quindi l'effetto del vantaggio del tempo di iniezione o del raffreddamento dell'aria ai bassi carichi.

Composizione della carica

Come visto l'ossido di azoto dipende dalla temperatura della fiamma; questa potrebbe essere ridotta agendo sulla composizione della carica incrementando il calore specifico e la concentrazione dei gas inerti. La strada intrapresa da molti è l'EGR (exhaust gas recirculation) il cui funzionamento è quello di prelevare una certa quantità dei gas di scarichi e di immetterli di nuovo in camera di combustione. Con carichi non elevati l'EGR riduce gli NO_x di un fattore 2 con minore effetto sul PM. Sebbene l'emissione di soot è incrementata dalla riduzione della concentrazione di ossigeno, la frazione solubile organica del PM e gli HC si riducono per la presenza in camera di combustione di temperature più elevate. Uno studio fatto sull'uso dell'EGR su un motore diesel heavy-duty, ha

messo in evidenza che si possono abbassare di molto gli NO_x (3g/kWh) con una diminuzione anche del PM.

L'EGR è considerato uno degli strumenti più promettenti per la riduzione degli NO_x , ma sono necessari altri studi sul design dei sistemi di combustione, sistemi di immissione e ricircolazione, raffreddamento agli alti carichi, accoppiamento di turbo macchine, usura e controllo nel funzionamento in transitorio.

Rapporto di compressione

I motori diesel contano sul rapporto di compressione per bruciare il combustibile. Un più alto rapporto di compressione, fa aumentare la temperatura dell'aria compressa, riduce il tempo di ritardo di accensione e produce una più elevata temperatura della fiamma. L'effetto di una riduzione del tempo di ritardo è una diminuzione degli NO_x , invece l'aumento della temperatura della fiamma potrebbe farli aumentare. In conclusione agire sul rapporto di compressione risulta avere un leggero vantaggio sugli NO_x .

Economia del combustibile, partenza a freddo, e massima pressione sono gli effetti del rapporto di compressione. Per un ideale ciclo diesel, l'efficienza termodinamica è una funzione crescente del rapporto di compressione. tuttavia in un ciclo reale, l'efficienza termodinamica ha un punto di massimo. Per i motori diesel questo rapporto va tra i 12 e 15, ma per assicurare una certa affidabilità nelle partenze a freddo questo valore cresce e va nel range tra 15 e 20. Generalmente, motori veloci con piccoli cilindri, richiedono alti rapporti di compressione per adeguate partenze a freddo.

Emission tradeoffs

Abbiamo visto che esiste un conflitto tra le emissioni di NO_x e di PM. Questo è alla base delle curve di tradeoffs. Il compromesso non è assoluto – una combinazione di tecniche possono portare a ridurre gli NO_x e il PM. Il compromesso sta nel fatto che questi inquinanti non possono essere ridotti ovunque in tutte le condizioni di funzionamento del motore, per minimizzare tutte le emissioni simultaneamente viene richiesta un'attenta ottimizzazione dell'iniezione del combustibile, mescolamento aria combustibile e processo di combustione su tutti i range di funzionamento del motore.

BIBLIOGRAFIA:

John B. Heywood: Internal combustion engine fundamentals

Francesco Avella: Caratterizzazione e controllo del particolato diesel

Abdul Khalek, I.S., et al., “Diesel Exhaust Particle Size: Measurement Issues and Trends”, SAE 980525

Asif Faiz, Christopher S. Weaver, Michael P. Walsh “Air Pollution from Motor Vehicles” pagine 105-108.

DieselNet Technology Guide: “What Are Diesel Emissions”

DieselNet Technology Guide: “Diesel Particulate Matter”

2) LIMITI DI EMISSIONE E CICLI DI PROVA

2.1 INTRODUZIONE

I limiti di emissione allo scarico di motori e veicoli in genere specificano le massime quantità prodotte da un motore a combustione interna in condizioni di funzionamento predefinite.

Tali limiti furono introdotti per la prima volta nel 1959 in California, per controllare la quantità di ossido di carbonio (CO) e di idrocarburi incombusti (HC) presenti nei gas di scarico dei motori ad accensione comandata. Oggi le quantità di CO ed HC, insieme ad altre sostanze presenti nei gas di scarico, sono regolamentate in molti paesi e per ogni tipo di motore.

Gli inquinanti vengono misurati attraverso dei test effettuati sul motore o sul veicolo, in laboratori attrezzati e con procedure standardizzate per assicurare la conformità dei risultati dei vari laboratori. Per i veicoli leggeri compresi i ciclomotori ed i motocicli, le prove vengono effettuate ponendo il veicolo o il motociclo su un apposito banco a rulli simulando un ciclo di guida standardizzato. Per riprodurre l'inerzia e la resistenza all'avanzamento del veicolo, si utilizzano per esempio delle opportune masse volaniche. Per i veicoli pesanti, cioè veicoli che pesano più di 3,5 t, si possono fare prove dinamiche e stazionarie, ma visto le masse in gioco, vengono effettuate prove solo sul motore posto al banco freno. Questi test, che sono una sequenza di funzionamento in determinati punti di carico-giri del motore, simulano per quanto possibile, il comportamento del veicolo su strada. Pochi sono i laboratori in Europa in grado di poter testare, con opportuni cicli di guida, motori heavy duty su banchi a rulli.

Nel primo caso le emissioni saranno misurate in g/km e nel secondo caso in g/kWh. In tabella 2.1 è rappresentato l'andamento dei valori di emissione negli anni 1992-2005 per le autovetture (benzina e diesel) e in tabella 2 i valori di emissione per i motori diesel heavy duty.

		EURO I	EURO II	EURO III	EURO IV
Emissioni di auto a benzina espressi in g/km		Direttiva 91/441 dal 1/7/1992	Direttiva 94/12 dal 1/1/1996	Direttiva 98/69 dal 1/1/2000	Direttiva 98/69 dal 1/1/2005
	CO	2.72	2.2	2.3	1.0
	HC	-	-	0.20	0.1
	NO_x	-	-	0.15	0.08
Emissioni di auto a gasolio espressi in g/km	HC+NO_x	0.97	0.5	-	-
	CO	2.72	1.0	0.64	0.50
	NO_x	-	-	0.50	0.25
	HC+NO_x	0.97	0.7	0.56	0.30
	TPM	0.14	0.08	0.05	0.025

Tabella 2.1: Valori di emissione per auto a benzina e auto diesel.

Un ciclo di prova stazionario utilizzato in Europa come il 13 modi R49 o il più recente ESC (European Steady-State Cycle), è formato da una successione di punti diversi di funzionamento del motore in condizioni stazionarie. Come abbiamo detto questa prova viene effettuata quando si ha il motore al banco e collegato ad un freno dinamometrico.

Un ciclo di prova transitorio FTP (Federal Test Procedure) o ETC (European Transient Cycle), è formato da una serie continua di variazioni di regime-coppia che il motore deve seguire. E' praticamente un percorso di guida in cui sono presenti cambi di velocità, di carico, accelerazioni, decelerazioni etc. ed è in genere effettuato con il veicolo sul banco a rulli.

I cicli e i limiti di emissioni cambiano da Stato a Stato e quindi bisogna fare attenzione quando si confrontano. In Europa i limiti riguardanti gli inquinanti vengono chiamati comunemente dal 1992 Euro I, Euro II, etc.

La normativa Euro I per i veicoli pesanti fu introdotta nel 1992, successivamente nel 1996 entrò in vigore la Euro II ed infine nel 1999 è entrata in vigore la Euro III per i veicoli a minor impatto ambientale e invece nel 2000 per i veicoli diesel heavy-duty. Per i motori Euro III, è diventato obbligatorio testare anche l'opacità dei gas di scarico secondo un ciclo di prova ELR (European Load Response) oltre al ciclo di prova ESC per gli inquinanti regolamentati in cui il motore al banco freno, viene fatto funzionare in determinati regimi di rotazione e all'interno di ogni regime, si varia opportunamente il carico del motore. Nel 2008 i veicoli pesanti saranno nella fase Euro V. Ogni normativa sostituisce la precedente e fissa nuovi e sempre più severi limiti alla quantità di inquinanti che il veicolo può emettere.

La tabella che segue mostra un riassunto dei limiti imposti da ogni normativa.

<i>Emissioni Standard per motori diesel HD</i> espressi in g/kWh e l'opacità in m ⁻¹							
Fase	Anno	Test Ciclo	CO	HC	NOx	PM	Opacità
EuroI	1992 <85 kW	ECE R-49	4.5	1.1	8.0	0.612	
	1992 >85 kW		4.5	1.1	8.0	0.36	
EuroII	1996		4.0	1.1	7.0	0.25	
	1998		4.0	1.1	7.0	0.15	
EuroIII	1999 solo veicoli EEV	ESC & ELR	1.5	0.25	2.0	0.02	0.15
	2000	ESC & ELR	2.1	0.66	5.0	0.10 0.13*	0.8
EuroIV	2005		1.5	0.46	3.5	0.02	0.5
EuroV	2008		1.5	0.25	2.0	0.02	0.5
* - per motori con cilindrata inferiore di 0.75 dm ³ per cilindro e un regime nominale maggiore di 3000 min ⁻¹							

Tabella 2.2: Valori di emissione per motori diesel heavy duty.

E' al vaglio una proposta che prevede l'introduzione di sistemi OBD (on board diagnostic) sugli HDV (heavy duty vehicle) e di prove di durata che certifichino la rispondenza ai limiti durante la vita utile del motore, come già si fa negli USA.

Procedure valide in Europa per motori al banco

In Europa nel 1988 fu istituito il primo ciclo di prova (R49) di tipo stazionario, usato poi come riferimento per quantificare gli inquinanti nella normativa Euro I ed Euro II. E' caratterizzato dalla presenza di 13 modi di funzionamento che combinano carico e regime di rotazione, le misure vengono effettuate per ogni punto e successivamente mediate attraverso dei fattori di peso. L'unità di misura utilizzata per gli inquinanti è il g/kWh.

La tabella sottostante mostra i 13 punti.

ECE R49 13-modi			
Modalità	Regime motore	Carico %	Fattore di ponderazione
1	minimo	-	0.25/3
2	Regime di massima coppia	10	0.08
3		25	0.08
4		50	0.08
5		75	0.08
6		100	0.25
7	minimo	-	0.25/3
8	Regime di massima potenza	100	0.10
9		75	0.02
10		50	0.02
11		25	0.02
12		10	0.02
13	minimo	-	0.25/3

Tabella 2.3: 13 modi R49.

Nel grafico che segue vengono rappresentate le 13 modalità di funzionamento su una tipica curva di potenza del motore. La grandezza del punto rappresenta il peso che quella modalità avrà nella media finale.

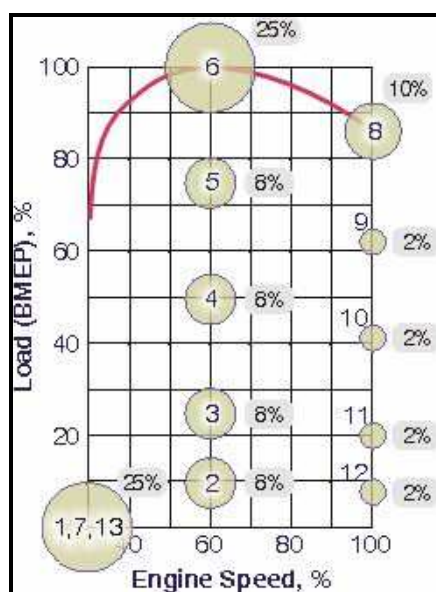


Figura 2.1: Rappresentazione delle 13 modalità di funzionamento su una tipica curva del motore.

Nel 1999 fu creato un altro ciclo di prova per motori al banco, sempre stazionario, che ha sostituito il precedente R49. Tale ciclo chiamato ESC è divenuto obbligatorio dal 2000.

Oltre al ciclo ESC ed ELR, è stato introdotto anche un ciclo di prova transitorio ETC (European Transient Cycle). Tale ciclo di prova che è entrato in vigore dal 2005 per gli heavy-duty si affiancherà all'ESC o all'ELR.

Ogni singola modalità del 13 modi ESC della direttiva 1999/96/CE, ha una determinata condizione di carico e regime di rotazione che deve essere mantenuta per il tempo prescritto (2 minuti tranne il primo, 4 minuti) e nei primi 20 secondi di ognuna, si devono cambiare e stabilizzare le condizioni di funzionamento.

A differenza del ciclo R49 con l'ESC il motore si troverà ad essere testato in tre posizioni differenti di regime denominati regime A, B e C, inoltre al minimo si troverà una sola volta contro le tre volte dell'R49.

La prova ESC prevede che durante la sequenza prescritta di funzionamento a caldo, si analizzino in continuo le emissioni gassose grezze prelevandole con una sonda riscaldata posta sul condotto di scarico e inviandole ai singoli analizzatori di HC, CO, CO₂ e NO_x. I valori letti da tutti gli analizzatori vengono registrati da un sistema di acquisizione per tutta la durata della prova.

Per il particolato (PM), in base alla modalità di funzionamento del motore viene spillata una quantità di gas con una sonda calda; quantità che viene diluita con aria condizionata e fatta passare su una coppia di filtri per raccogliere la parte non gassosa dei gas di scarico.

Modalità numero	Regime motore	Carico percentuale	Fattore di ponderazione	Durata della modalità	Tempo [s] minimo campionamento Particolato
1	minimo	-----	0.15	4 minuti	60
2	A	100	0.08	2 minuti	32
3	B	50	0.10	2 minuti	40
4	B	75	0.10	2 minuti	40
5	A	50	0.05	2 minuti	20
6	A	75	0.05	2 minuti	20
7	A	25	0.05	2 minuti	20
8	B	100	0.09	2 minuti	36
9	B	25	0.10	2 minuti	40
10	C	100	0.08	2 minuti	32
11	C	25	0.05	2 minuti	20
12	C	75	0.05	2 minuti	20
13	C	50	0.05	2 minuti	20

Tabella 2.4: 13 modi ESC.

Durante ciascuna modalità si dovrà determinare la concentrazione di ciascun inquinante, la portata dei gas di scarico e la potenza al freno, ponderando i valori misurati con alcuni coefficienti. Si procederà poi al calcolo dei g/kWh di ciascun inquinante emesso, come descritto nella stessa normativa.

Raffigurando ora i 13 punti su un piano come fatto in precedenza per l'R49 otteniamo il grafico seguente. Anche qui la grandezza del punto rappresenta il peso che esso avrà nella media finale.

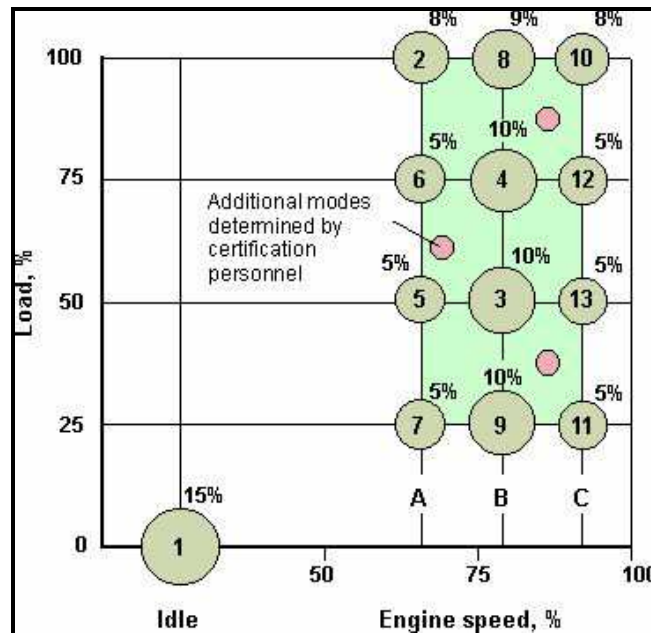


Figura 2.2: Rappresentazione delle 13 modalità di funzionamento dell'ESC su una curva motore.

Passiamo ora ad una descrizione più dettagliata di tutto ciò che è necessario per realizzare una prova ESC secondo la direttiva.

Per svincolare la prova dalle condizioni atmosferiche, la normativa impone di misurare la temperatura assoluta (T_a) dell'aria di alimentazione del motore e la pressione (p_s) atmosferica riferita al secco in kPa, e poi determinare il parametro F come segue:

$$F = \left(\frac{99}{p_s} \right) \cdot \left(\frac{T_a}{298} \right)^{1.5}$$

Affinché la prova sia valida, il parametro F deve rientrare nei seguenti valori:

$$0.96 \leq F \leq 1.06$$

Poiché il sistema di alimentazione dell'aria usato in laboratorio, così come quello di scarico, sono certamente diversi da quelli montati sul veicolo equipaggiato con il motore in esame, è stabilito che

il sistema di aspirazione deve presentare una limitazione nell'aspirazione dell'aria entro ± 100 Pa con il limite superiore del motore funzionante al regime di potenza massima dichiarata e a pieno carico. Quello di scarico invece, deve presentare una contropressione allo scarico entro ± 1000 Pa con il limite superiore del motore funzionante sempre al regime di potenza massima dichiarata e a pieno carico.

Se il motore è equipaggiato con un dispositivo di post-trattamento dei gas di scarico, il condotto di scarico deve avere lo stesso diametro per almeno 4 diametri del condotto a monte dell'ingresso della sezione di espansione del dispositivo di post-trattamento. La contropressione allo scarico deve rispettare i limiti già visti in precedenza.

Per la determinazione dei regimi A, B e C di rotazione del motore per la prova ESC, bisogna tracciare la curva di potenza e individuare il 50% e il 70% della potenza massima, in corrispondenza dei quali individuati i punti n_{lo} e n_{hi} si applicano le seguenti formule:

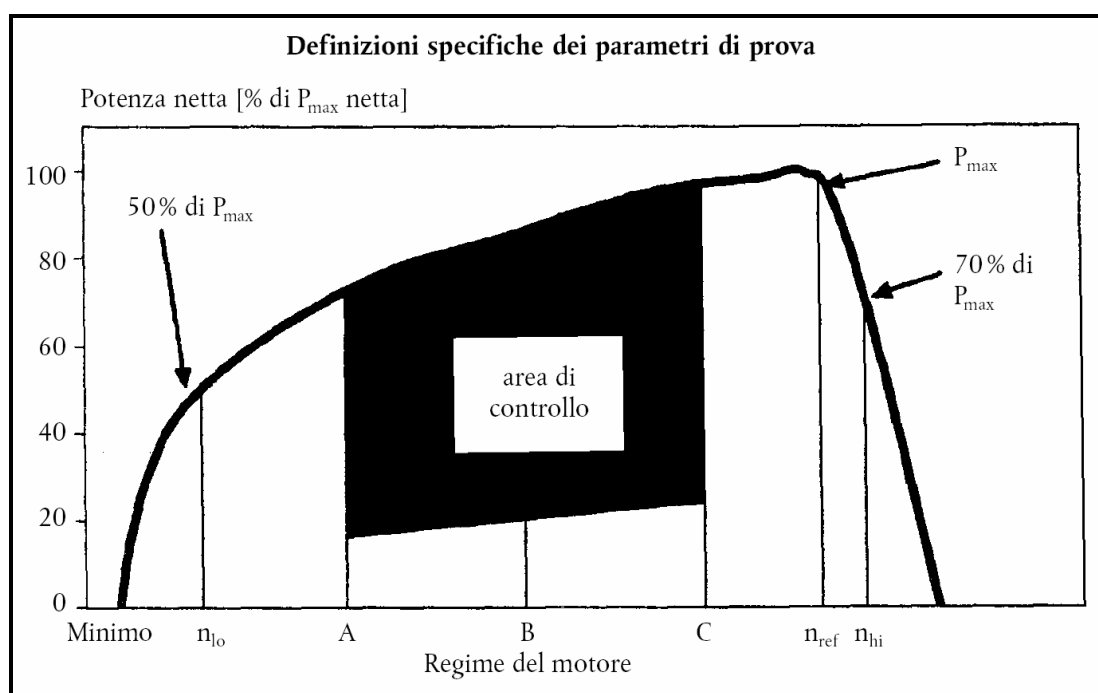


Figura 2.3: Determinazione dei tre regimi di prova.

$$A = n_{lo} + 25 \% (n_{hi} - n_{lo})$$

$$B = n_{lo} + 50 \% (n_{hi} - n_{lo})$$

$$C = n_{lo} + 75 \% (n_{hi} - n_{lo})$$

Ogni prova ESC prevede dopo l'esecuzione della tredicesima modalità, di verificare gli NO_x in altri tre punti di funzionamento all'interno dell'area di controllo.

Inoltre durante ciascuna modalità viene acquisito o letto:

regime del motore;

carico del motore;
temperatura di bulbo asciutto e bulbo bagnato della sala;
temperatura aria aspirazione;
depressione aria aspirazione;
temperatura gas di scarico;
contropressione allo scarico;
portata di combustibile;
portata aria di aspirazione;
temperatura dell'aria di sovralimentazione;
temperatura del combustibile;

ogni altro dato ulteriore occorrente per il calcolo degli inquinanti come illustrato in seguito.

Al termine di ogni prova si procede con un azzeramento e ricalibrazione di tutti gli analizzatori. La prova è considerata accettabile se la differenza tra i valori letti prima e dopo nella fase di calibrazione di ogni strumento, è minore del 2 %.

2.2 CALCOLO DELLE EMISSIONI GASSOSE E DEL PARTICOLATO

Per la determinazione delle emissioni gassose, si calcola la media dei valori acquisiti relativi agli ultimi 30 secondi di ciascuna modalità, per ogni inquinante e si determinano le concentrazioni medie di HC, CO ed NO_x.

Di seguito una sommaria descrizione delle modalità di calcolo imposte dalla normativa.

La portata dei gas di scarico G_{EXHW} del motore, viene determinata facendo la somma della portata d'aria e della portata di combustibile in kg/h:

$$G_{EXHW} = G_{AIRW} + G_{FUEL}$$

G_{EXHW} = portata massica dei gas di scarico su umido;

G_{AIRW} = portata massica aria di aspirazione umida;

G_{FUEL} = portata massica combustibile.

Le concentrazioni misurate su secco di CO , HC ed NO_x devono essere convertite nel valore su umido, con degli opportuni coefficienti.

Si passa poi dalle concentrazioni lette [ppm] alle portate massiche [g/h] per ciascuna modalità per arrivare poi alle emissioni specifiche [g/kWh] di tutta la prova, attraverso dei coefficienti di ponderazione e la potenza netta erogata dal motore.

Per misurare i valori di NO_x nei tre punti Z aggiuntivi dell'area di controllo si usano le stesse formule degli altri 13 modi e si calcola l'emissione specifica per ogni punto Z considerato.

Si determina poi il valore di NO_x, sempre nei tre punti Z, mediante interpolazione dalle modalità del ciclo di prova più prossime al rispettivo punto di controllo.

Facendo riferimento al diagramma si ha che:

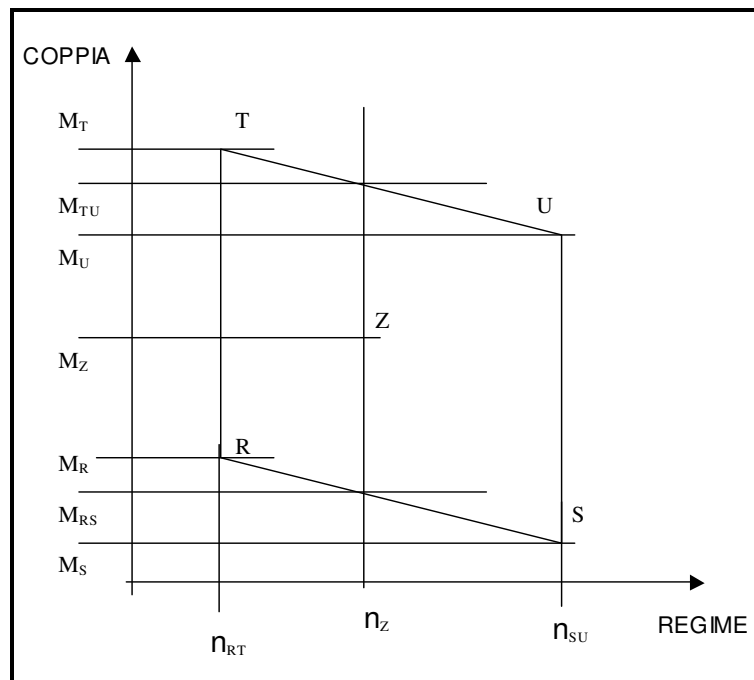


Figura 2.4: Determinazione dei punti di controllo degli NO_x.

Z = punto di controllo scelto;

T, U, R, S, = punti tra i 13 della normativa più vicino a Z;

M_R M_S M_T M_U = coppia motore nei punti R S T U

n_{RT} = regime punti R e T

n_Z = regime punto Z

n_{SU} = regime punti S e U

E_R E_T E_S E_U = emissione specifica di NO_x nei punti R S T U

Si calcola l'emissione specifica E_Z ottenuta per interpolazione e la si confronta con quella calcolata nel punto Z e la prova è ritenuta valida se lo scarto è minore del 10%.

Per il calcolo dei g/kWh di particolato, si usa un minitunnel a flusso parziale (non tutto il gas di scarico viene prelevato), con elaborazione del segnale di G_{air} e G_{fuel} ed a campionamento totale (tutto il particolato diluito viene raccolto su una coppia di filtri).

2.3 Influenza del ciclo su consumi ed emissioni

Dallo studio di alcuni lavori si nota che il ciclo di prova influenza i consumi e le emissioni.

Facendo un confronto tra le particelle emesse secondo due tipi di cicli di prova diversi (ETC e ESC), ottenuto su un motore IVECO Cursor8 rispondente alle direttive di emissioni ESC 1999/96 (EURO 3), si è notato che attraverso lo strumento di analisi SMPS (Scanner Mobility Particulate Size), utilizzato in modo diverso visto la sua velocità di risposta, le particelle emesse come dimensioni hanno concentrazioni differenti, ma rientrano nello stesso range di misura.

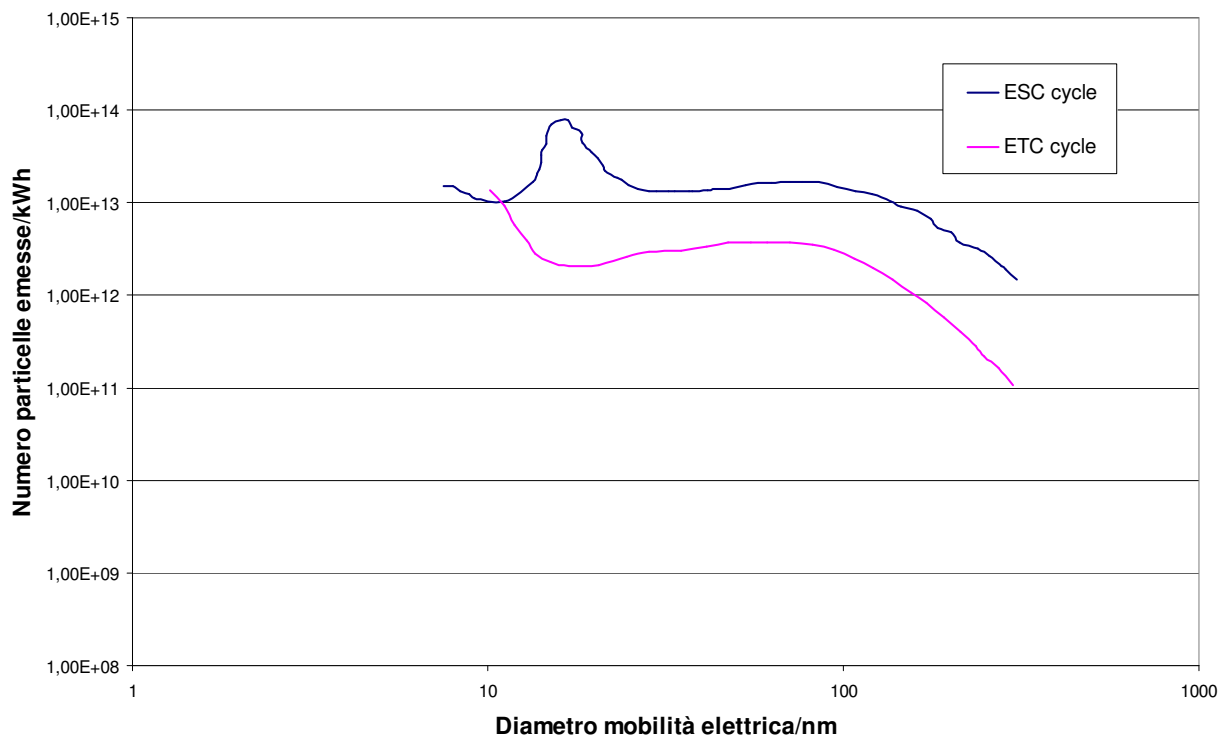


Figura 2.5: Particelle emesse da un motore con due cicli di prova diversi.

Stesso discorso vale per gli inquinanti regolamentati emessi. Come si può notare dalla tabella 2.5 gli idrocarburi e il monossido di carbonio variano molto, cosa che invece non accade per il particolato totale.

Inquinanti regolamentati [g/kWh]	Ciclo ETC	Ciclo ESC
HC	0,31	0,22
CO	0,8	0,5
NO _x	5,89	5,27
PM	0,066	0,07

Tabella 2.5: Inquinanti regolamentati emessi dal motore con due cicli di prova diversi.

In un lavoro di Luc Pelkmans si è fatto un confronto di emissioni e consumi utilizzando diversi cicli di prova fatti sul banco a rulli. Il bus usato è tipo VAN HOOL A600 su cui era montato un motore

DAF di 160kW (EURO 2) alimentati a gasolio. Utilizzando dei cicli di guida diversi da quelli europei standardizzati per prove di omologazione, si nota che questo a seconda del ciclo di prova usato, le emissioni e i valori di consumo cambiano. Infatti per un ciclo di prova prettamente rurale si ha un consumo medio di circa 2,8 Km con un litro di gasolio, invece con un ciclo di prova urbano si percorre circa 1,6 Km con un litro di gasolio. Stesso discorso vale anche per gli inquinanti regolamentati dove risultano tutti aumentati tra il 60 e il 70% quando si passa da un ciclo rurale ad uno urbano.

BIBLIOGRAFIA:

Direttiva Europea 1999/96/CE

Direttiva Europea 91/542/CE

Luc Pelkmans, Dirk De Keukeleere et al. “Influence of Vehicle Test Cycle Characteristics on Fuel Consumption and Emissions of City Buses” SAE 01FL-308

Jon D. Andersson et al. “Particle Emissions From a EU 3 Heavy-duty Diesel Engine with Catalyst-based Diesel Particle and Selective Catalytic Reduction System: Size, Number, Mass & Chemistry” 2003

E. Zervas, et al. “ Comparison between the exhaust particles mass determined by the European regulatory gravimetric method and the mass estimated by Elpi” SAE: 2005-01-2147

3) SISTEMI DI POST-TRATTAMENTO ALLO SCARICO

3.1 INTRODUZIONE

Negli ultimi anni, anche a causa dell'aumento del costo dei combustibili, c'è stato una maggiore diffusione del motore diesel negli autoveicoli leggeri, migliorato dai costruttori con motori ad iniezione indiretta veloci e a iniezione diretta, tale da renderlo competitivo con quello ad accensione comandata. Il particolato e le altre specie inquinanti emesse da tutti i veicoli con motori a combustione interna, sono causa del degrado della qualità dell'aria e da diversi anni ormai è stata riconosciuta l'azione cancerogena sugli animali e sull'uomo. Sono questi i motivi che hanno spinto fin da 1982 le autorità governative dei paesi industrializzati (Europa, Usa, Giappone) a emettere disposizioni per limitare l'impatto degli autoveicoli sull'ambiente.

Con l'introduzione di limiti di emissione più restrittivi a partire dai primi anni Novanta, direttiva 91/441/CE e successivi aggiornamenti, i costruttori sono stati indotti ad applicare il catalizzatore a tre vie nei nuovi modelli a benzina. Con questo dispositivo il livello delle tre specie di inquinanti, CO, HC, NO_x si riduce da 80 a 95% in dipendenza delle condizioni di marcia del veicolo e dello stato di efficienza del catalizzatore rendendolo paragonabile se non inferiore, limitatamente all'emissione dell'ossido di carbonio e degli idrocarburi, a quello delle autovetture diesel.

Per soddisfare le restrizioni imposte anche sulle emissioni dei veicoli diesel, è stato necessario dare negli ultimi anni un maggiore impulso alla ricerca di soluzioni tecniche per ridurre quelle degli ossidi di azoto e del particolato. Le azioni svolte sul piano tecnologico riguardano il miglioramento della geometria della camera di combustione, l'adozione di sistemi di iniezione ad elevata pressione, l'applicazione di dispositivi di controllo elettronico nell'apparato di iniezione, lo sviluppo di dispositivi di abbattimento catalitico e il miglioramento della qualità del combustibile. Ma nonostante tutto questo il livello di inquinamento delle città è ancora alto e le autorità governative sono state costrette a bloccare l'ingresso delle auto non catalitiche nei centri cittadini e ad imporre, alle società dei trasporti, di adottare dei provvedimenti per ridurre le emissioni di particolato dei veicoli di vecchia generazione, ancora in giro per le città.

Il particolato, specialmente il PM 2,5, risulta essere pericoloso per gli alveoli polmonari con conseguenze per la salute. Infatti da studi recenti si è visto che, non solo la quantità emessa di queste particelle è pericolosa ma anche la dimensione che queste hanno, e si è visto che le particelle emesse dallo scarico dei motori diesel sono particelle nanometriche la cui concentrazione numerica aumenta con il miglioramento della tecnologia utilizzata nella costruzione dei nuovi motori.

Considerate le attuali normative e visto che a livello Nazionale esistono ancora motori diesel di vecchia generazione, c'è un grosso interesse a trovare dei sistemi aftermarket per abbattere le

emissioni inquinanti da adottare sui veicoli diesel heavy duty, senza che questi dispositivi vadano ad inficiare le prestazioni motoristiche dei propulsori e che non richiedano elevati costi per il montaggio e la manutenzione successiva. Per aftermarket s'intende qualunque dispositivo, combustibile o additivo, che applicati o introdotti al motore portano ad una riduzione delle emissioni inquinanti in particolare il particolato e gli ossidi di azoto.

Nella mia ricerca ho posto l'attenzione sui dispositivi aftermarket per motori heavy duty, passo ora a descrivere alcuni di questi dispositivi presenti sul mercato utilizzati per ridurre le emissioni.

3.2 Materiali filtranti

I filtri sono dei dispositivi che vengono posti sul condotto di scarico in modo da catturare le particelle di particolato e trattenerle fino a quando non vengono ossidate durante il processo di rigenerazione, che può essere periodico o continuo.

Il materiale che costituisce il filtro può essere formato da:

- Monolita con flusso a parete;
- Fibre ceramiche;
- Schiuma ceramica;
- Fibre metalliche;
- Metalli sinterizzati;
- Carta;
- Fogli metallici.

Anche se esistono molti materiali che formano i filtri, quello maggiormente impiegato è costituito da materiale ceramico con flusso a parete.

<i>Utilizzo stimato di materiale filtrante</i>	
Monolita ceramico con flusso a parete	70%
Fibre ceramiche (arrotolate e maglia)	25%
Metalli sinterizzati	4%
Altri materiali	1%

Di seguito è presentata una breve descrizione dei materiali impiegati per i filtri per particolato diesel.

Monolita con flusso a parete

I filtri più comuni sono formati da materiale ceramico con una struttura interna costituita da centinaia di canali alternativamente ostruiti ad una estremità. Ogni singolo canaletto ha sulla parete interna un supporto su cui è depositato l'agente catalizzatore che promuove l'ossidazione del particolato.

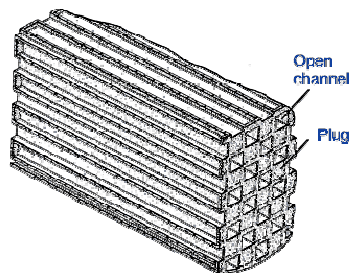


Figura 3.1: Filtro di materiale ceramico con canali alternativamente ostruiti.

Il dispositivo di figura 3.1 è un composito sintetico ceramico (cordierite) la cui formula è $2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$. Inizialmente questo materiale è stato sviluppato per i convertitori catalitici per motori ad accensione comandata. La cordierite è caratterizzata da un basso coefficiente di espansione, che gli permette di resistere a forti cicli termici e agli stati tensionali. Monoliti ceramici con flusso a parete, possono anche essere fatti di silicon carbide SiC che resiste a temperature più alte rispetto alla cordierite (circa 1800°C), ma ha un più alto coefficiente di espansione e un maggior costo.

Nella fase iniziale il particolato va all'interno dei pori delle pareti attraverso una iniziale deposizione per diffusione; incrementando il carico sul filtro, uno strato di soot si forma sulla superficie dei canali del monolita e dopo la formazione di questo layer esso agirà come strato filtrante aumentando l'efficienza di filtrazione che raggiunge e supera il 90%.

Fibre ceramiche

In numerosi sistemi di filtrazione vengono utilizzate fibre ceramiche: cartucce di fibre avvolte o impaccettate intorno a un supporto di acciaio, o sottili fibre ceramiche a forma di fogli di carta o di tessuto.

Per la rigenerazione di questi sistemi è necessario l'utilizzo di additivi, bruciatori o riscaldamento elettrico, questo perché è difficile coprire le fibre di materiale catalizzante. Inoltre c'è la possibilità che questo tipo di filtro possa emettere le proprie fibre durante il funzionamento a causa della rottura del filtro, con conseguenze negative per la salute umana.

Si è detto che una cartuccia filtrante è fatta avvolgendo strati continui di fibre su un tubo metallico perforato e disposti in modo tale che i gas di scarico sono forzati a passarci attraverso lasciando sul

filtro il particolato contenuto nei gas di scarico. Un esempio di una cartuccia di fibre avvolte è il filtro prodotto dalla Nextel fibers sviluppato dalla 3M; altri filtri sono stati realizzati utilizzando fibre lavorate o strati di fibre su supporti tale da realizzare un flusso a spirale.

Questi filtri, hanno un'efficienza di filtrazione minore rispetto a quella dei filtri monolitici, tuttavia hanno un maggior effetto sulla riduzione del numero di particelle. Se usati con degli additivi per la rigenerazione periodica, hanno meno problemi di contropressione a causa del deposito della cenere rispetto ai monoliti, ma la cenere può avere un effetto sulla durata delle fibre per ciò che riguarda la loro sensibilità alle alte temperature.

Design alternativi ai filtri di fibra sono quelli dove le fibre vanno a formare fogli sottili con un processo di realizzazione simile a quello della costruzione della carta. Un esempio di fibre filtranti è quello plissè, con un design simile a quello del filtro dell'aria del motore.

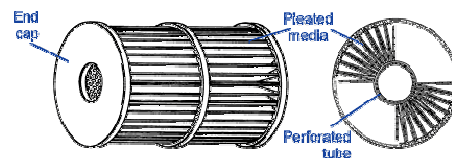


Figura 3.2: Filtro plissè per la cattura del particolato.

Questo e altri filtri con fibre di carta ceramiche operano maggiormente come filtri a letto profondo e quando la quantità di soot catturata aumenta, il processo di filtrazione della superficie migliora.

La rigenerazione periodica di questi sistemi è realizzata per mezzo di un riscaldatore elettrico che ha la forma di un panno di fili metallici su uno strato di SiC che agisce invece come materiale filtrante. L'efficienza inizialmente è del 65% circa e cresce fino al 90% quando il carico di soot aumenta.

Il composto di SiC e fibre di allumina realizzato dalla Feetguard, forma un elemento filtrante con flusso a parete. Il composto acquoso che contiene fibre di allumina con spessore intorno ai 3 μm , va a formare fogli di carta flessibile come in figura 3.3. I canali sono alternativamente chiusi con un sigillante di cemento ad alta temperatura permettendo al gas che vi entra di passare attraverso le pareti. I canali hanno una sezione triangolare con un lato del triangolo tra 3 e 5 mm e un canale lungo tra 70 e i 350 mm.

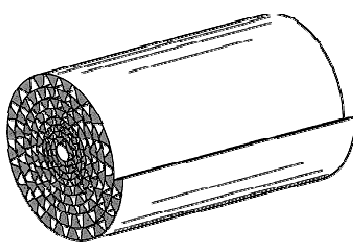


Figura 3.3: Filtro di materiale ceramico con flusso a parete.

Questi filtri vengono ricoperti con resine di formaldeide e portati a 1000°C, poi ricoperti di silicocarbide attraverso un processo di deposizione dei vapori e stabilizzato poi a circa 650°C.

Schiuma ceramica

Le schiume rigide ceramiche sono state ampiamente studiate come filtri per particolato.

I filtri di schiuma hanno per la maggior parte fori circolari di 250 a 500 micrometri di diametro e densità di 20-30 pori per cm². La schiuma è prodotta impregnando una matrice spugnosa di poliuretano con pasta ceramica, successivamente le parti vengono calcinate decomponendo il poliuretano e ottenendo una struttura rigida ceramica.

I filtri possono essere fatti in modo simile ai monoliti con flusso a parete di cordierite o silicocarbide e possono anche loro essere catalizzati. L'efficienza di filtrazione però è bassa (60-70%) questo perché hanno poca capacità di trattenere il soot, inoltre a parità di portata dei gas di scarico, i volumi necessari per le schiume ceramiche sono più grandi.

Filtri di fibre metalliche

Consistono in cartucce di mesh di fili, lane metalliche o velli metallici. L'interesse verso questi tipi di filtri è dovuto principalmente alla loro potenziale compatibilità con i vari sistemi di rigenerazione, includendo catalizzatori con washcoat di allumina-base o rigenerazione elettrica. Lo svantaggio dei filtri di fibre metalliche – spesso caratterizzate da grossi volumi vuoti (95%) - è dovuto alla tendenza a liberare il soot intrappolato.

Nel filtro di maglia di lana d'acciaio sviluppato da Texaco, il metallo è ricoperto con allumina per migliorare l'efficienza (50-70%) che va ad aumentare man mano che il particolato si deposita sul filtro e poi va a decrescere a causa del rilascio degli agglomerati di particelle.

Il filtro “vello metallico” per applicazione diesel sviluppato da Bekaert, ha filamenti di 21 micrometri di diametro di una lega di Fe-Cr ricoperti con una sostanza “Y”. Questi fogli sono piegati a formare cartucce e un sistema elettrico è stato utilizzato per effettuare periodiche rigenerazioni.

Metalli sinterizzati

Materiali di polvere sinterizzata sono stati sviluppati per migliorare l'efficienza di filtrazione del particolato diesel. Il design più comune è fatto di fogli a maglia di filo di acciaio, ricoperti di polvere di metallo miscelato con additivi. Ogni singolo foglio ricoperto e sinterizzato, va a formare vari tipi di filtri attraverso tecniche specifiche come taglio stampo, cucitura e fusione. La Purem ha realizzato un filtro con fogli di metallo sinterizzato tagliati in forma circolare e alternativamente uniti dentro e fuori il loro perimetro per formare una struttura come in figura 3.4.



Figura 3.4: Filtro metallico prodotto dalla Purem.

Le proprietà meccaniche dipendono dalle proprietà della mesh del filo e la porosità dipende dalla polvere di metallo e dal suo processo di sinterizzazione.

Poiché i metalli sinterizzati non possono essere catalizzati, sono stati testati con degli additivi o anche con un catalizzatore di NO_2 a monte. Questi filtri mostrano una maggiore resistenza contro le occlusioni dovute alle ceneri degli additivi rispetto agli altri tipi di substrati ed inoltre possono assumere forme diverse e possono essere facilmente modellati.

Altri materiali filtranti

Un altro materiale filtrante è realizzato attraverso dei sottilissimi fogli ($50\text{--}100\text{ }\mu\text{m}$) di schiuma di una lega metallica di Ni-Cr-Al i cui pori hanno una dimensione da 150 a $400\text{ }\mu\text{m}$. I fogli metallici porosi sono alternati con fogli che si riscaldano per la rigenerazione del filtro. L'ingresso al materiale corrugato è alternativamente sigillato ai lati opposti realizzando un dispositivo filtrante con flusso a parete che libera i gas di scarico del contenuto di particolato.

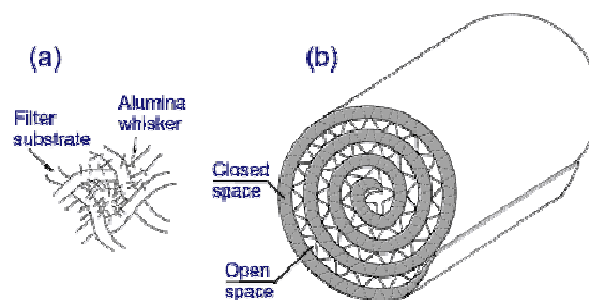


Figura 3.5: Filtro metallico con flusso a parete.

Filtri di carta plissettati

Le cartucce di carta plissettati che somigliano ai filtri di carta dell'aria di aspirazione dei motori, possono essere usati come filtri per i gas di scarico dei diesel. Hanno una capacità filtrante vicino al 100%, ma necessitano che i gas di scarico siano raffreddati per evitare che il soot accumulato sul filtro possa prendere fuoco ($T_{\max}=80\div120^{\circ}\text{C}$). Visto che questi filtri sono di carta, hanno una scarsa resistenza meccanica e l'utilizzo di carta sintetica, ne incrementa la massima temperatura di accensione con pochissimi ulteriori vantaggi.

Questi tipi di filtri sono impiegati nelle miniere sotterranee in USA e su alcuni veicoli che operano in atmosfere esplosive, dove la temperatura dei gas di scarico è limitata da condizioni di sicurezza.

Tutti i materiali filtranti descritti, hanno periodicamente necessità di rigenerarsi per liberare il dispositivo del soot intrappolato che crea contropressione allo scarico del motore. Un buon filtro deve fare poche rigenerazioni, preferibilmente totalmente automatiche e durante la rigenerazione, il particolato deve essere ossidato.

La figura successiva mostra una classificazione dei sistemi filtranti basati sul principio della rigenerazione.

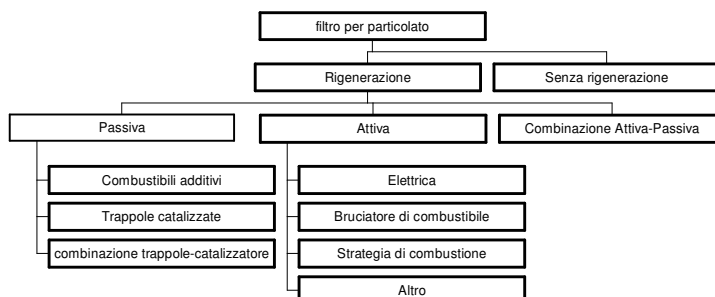


Figura 3.6: Classificazione dei filtri in base ai metodi di rigenerazione.

Poiché la temperatura del gas di scarico è quasi sempre troppo bassa per ottenere una rigenerazione della trappola, il problema può essere risolto diminuendo la temperatura di combustione del soot intrappolato, oppure incrementando la temperatura del soot ad un valore che rende possibile l'ossidazione. Il primo approccio è usato nei filtri passivi, il secondo nei filtri attivi.

Nei sistemi passivi, la temperatura di ossidazione del soot è diminuita introducendo un catalizzatore ossidante direttamente sulla superficie del filtro o aggiunto al combustibile come additivo. I filtri catalizzati possono utilizzare una base di platino o metalli base catalizzanti. Invece per gli additivi dei combustibili parliamo di ferro, cerio, rame, platino o miscele di metalli.

Un altro approccio è quello di attivare la rigenerazione innalzando la temperatura del filtro attraverso un riscaldatore elettrico o un bruciatore di combustibile.

Questi filtri possono essere poi suddivisi in sistemi a flusso parziale o totale. Nel sistema a flusso totale, quando il filtro richiede una rigenerazione, tutto il gas di scarico è riscaldato alla temperatura necessaria per l'ossidazione del particolato accumulato sul filtro. Nel sistema a flusso parziale il flusso principale, quando è richiesta una rigenerazione, è deviato dal filtro e solo una piccola quantità di gas di scarico è riscaldata per la rigenerazione. Una modificazione del sistema a flusso parziale è quella di riscaldare aria per la rigenerazione. In questo caso il gas di scarico bypassa il filtro, che invece viene rigenerato da una piccola quantità di aria riscaldata ad una determinata temperatura. I sistemi a flusso parziale, come pure i sistemi ad aria riscaldata, sono più complicati meccanicamente (valvole, compressori d'aria, etc.) ma richiedono meno energia.

Nelle nuove tecnologie, la temperatura dei gas di scarico può essere incrementata agendo sulla combustione, per esempio nei sistemi di iniezione common rail si può effettuare una post iniezione. Altre strategie possono essere: cambiare il tempo di iniezione e la quantità iniettata, uso dell'EGR, strozzatura dell'aria di ingresso.

Le trappole attive quindi, sono molto più complesse rispetto ai filtri passivi, infatti questi richiedono hardware più sofisticati, controlli elettronici e sistemi di controllo della rigenerazione. Queste operazioni possono portare anche ad aumenti dei consumi necessari per la rigenerazione. I filtri passivi invece, visto la loro semplicità, sono più interessanti. La rigenerazione dei sistemi passivi è influenzata dall'uso del veicolo, infatti se il motore lavora a bassi carichi (per esempio minimo o lenti cicli di guida) per un prolungato periodo di tempo, il filtro potrebbe sovraccaricarsi di soot e dare problemi al motore. In alcuni casi, basta solo aumentare la percentuale di metallo sul supporto per evitare questi problemi. Un altro esempio potrebbe essere un filtro catalizzato equipaggiato con un riscaldatore elettrico dove, se la temperatura dei gas è molto alta, il sistema può autorigenerarsi da solo. Invece quando il carico è basso e quindi, la temperatura dei gas è più bassa, il sistema di rigenerazione elettrica potrebbe essere richiesto e la temperatura di rigenerazione potrebbe essere 400°C invece dei 600°C con semplici accorgimenti. In questo approccio attivo-passivo, l'aumento del consumo di combustibile potrebbe essere minimizzato visto che in questo caso viene richiesta una minore temperatura di rigenerazione e minori stress termici.

3.3 DESCRIZIONE DEI FILTRI COMMERCIALIZZATI

Filtri CRT

Il CRT (tecnologia di continua rigenerazione) è il nome commerciale dato ad un filtro passivo per il particolato, capace di rigenerarsi a temperature sotto i 300°C. Il CRT utilizza un filtro con un flusso a parete di materiale ceramico dove il particolato viene trattenuto e continuamente ossidato dal

diossido di azoto generato da un catalizzatore ossidante posto a monte del filtro, vedi figura 3.7. Richiede un combustibile a basso contenuto di zolfo e una minima quantità di NO_x/PM.

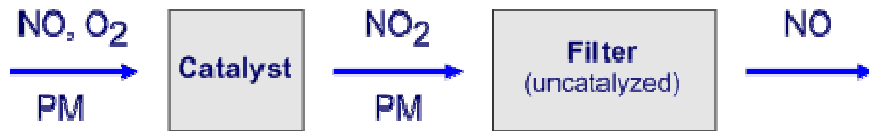
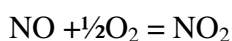


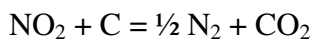
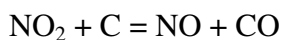
Figura 3.7: Configurazione di un filtro CRT.

Il principio della rigenerazione del CRT, brevetto della Johnson Matthey, si basa sul fatto che il PM è più facilmente ossidato dall'NO₂ che dall'O₂. Infatti il soot è ossidato dall'ossigeno con una reazione evidente a temperature superiori a 550°C, mentre con l'NO₂ il processo avviene a temperature intorno ai 250°C.

L'NO₂ necessario per la rigenerazione del filtro, è generato nel catalizzatore dall'ossido nitrico NO presente nei gas di scarico secondo la reazione:



e il PM intrappolato nel filtro è continuamente ossidato dall'NO₂ con le reazioni:



L'ossidazione del soot aumenta con la presenza del vapor d'acqua, presumibilmente dovuto alla formazione di HNO₃, formatosi dal NO₂ e H₂O, che reagisce anche con il carbone.

Ossidazione catalitica di NO nel filtro CRT

Gli NO_x emessi dal motore diesel sono composti essenzialmente dal 95-85% di NO e il 5-15% di NO₂. In funzione della temperatura, il catalizzatore del CRT può incrementare la frazione di NO₂ al 50% del totale di NO_x. L'ossidazione di NO a NO₂ è un equilibrio controllato dalla reazione cinetica quando la temperatura è bassa (< 300°C), invece è sotto controllo della termodinamica quando la temperatura è alta (> di 300°C). Se si opera a bassa temperatura, la conversione aumenta con un catalizzatore attivo e con un aumento della temperatura. L'aumento della conversione di NO a NO₂ può essere fatto anche aumentando il numero di catalizzatori attivi o aumentando la misura del catalizzatore. Ad alta temperatura la conversione NO/NO₂ è sotto controllo termodinamico, ma aumentando ancora la temperatura dei gas di scarico la conversione di NO diminuisce. La temperatura di conversione migliore di NO, avviene intorno i 250-350°C e con l'uso di un attivo catalizzatore ben dimensionato, la frazione di NO₂ può essere incrementata al 70-80% del totale di NO_x.

Appena l' NO_2 entra nel CRT, esso reagisce con il soot ossidandolo. Un certo eccesso di NO_2 è spesso necessario per mantenere un'apprezzabile quantità di reazione. Esperimenti mostrano che il totale di NO_x non è cambiata sul CRT, quindi la maggior parte di NO_2 si è trasformata in NO e quindi la 3° reazione, quella nella quale si ha l' N_2 , gioca un ruolo più marginale nel CRT.

Anche con il CRT, la rigenerazione del sistema può essere cambiata, entro certi limiti. Per esempio quando il motore compie prevalentemente determinati cicli lenti, si può incrementare la misura del catalizzatore e del filtro e/o incrementare la carica di metallo nobile sul catalizzatore. Se l'operazione non è possibile o il ciclo è a freddo, il filtro può intasarsi o avere delle incontrollate rigenerazioni.

Confronto con configurazioni alternative

Dalla figura 3.8 si può notare che si possono avere diverse configurazioni. Il classico CRT realizzato con un catalizzatore ossidante e un filtro non catalizzato; il CDPF (combustion diesel particulate filter) dove il catalizzatore è posto direttamente sulle pareti del filtro monolita; per finire un sistema combinato che include un catalizzatore ossidante seguito da un CDPF.

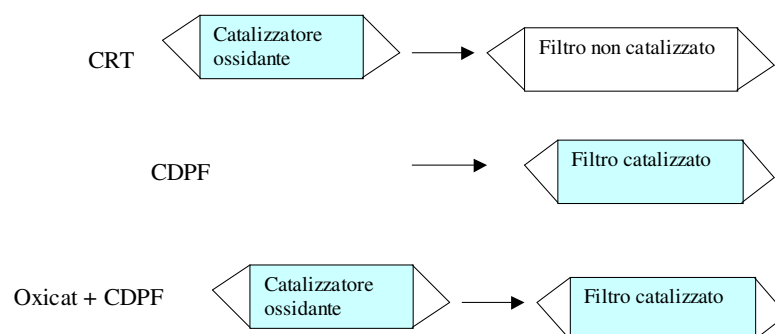


Figura 3.8: Diverse configurazioni dei filtri.

Per la rigenerazione, il CRT dipende esclusivamente dall' NO_2 prodotto dal catalizzatore, mentre per la rigenerazione di un CDPF, è importante l'ossigeno e gli NO_2 . Infatti il meccanismo di rigenerazione dell' NO_2 , accadrebbe anche nel CDPF ricoperto con metallo nobile catalitico come il platino, con un benefico effetto sul filtro di rigenerazione. Però mentre il CRT prefigura una configurazione di un reattore superiore che massimizza l'effetto di NO_2 , nel filtro catalizzato l' NO_2 è generato dentro le pareti del monolita e quindi non è possibile l'ossidazione della quantità di soot che viene a contatto all'ingresso dei canali del monolita.

Una molecola di NO_2 nel reattore del CRT può essere usata per una molecola di soot ossidandola, formando NO . L' NO in uscita dal filtro però non può essere ossidato ancora formando il diossido di azoto e usato per ossidare altre particelle di carbone. Questo è lo svantaggio del CRT che può essere superato combinando insieme i dispositivi. In alcune combinazioni come "oxicat + CDPF" il gas

che entra nel filtro è arricchito da NO_2 così come nel CRT e quando le molecole di NO sono ricreate durante la rigenerazione, possono attraverso il filtro poroso catalizzato, essere ossidati ad NO_2 dal platino. Questa seconda generazione di NO_2 ossida altre particelle di carbone, incrementando la performance della rigenerazione rispetto al classico CRT. In questa configurazione, la rigenerazione può essere aumentata dall'ossidazione catalitica del carbone con l'ossigeno.

Infatti prove in laboratorio con sistemi oxicat + CDPF confermano miglioramenti di rigenerazione, in termini di abbassamento di temperatura di bilancio e aumento della quantità rigenerata. La temperatura di bilancio è stata determinata su un motore al banco con un combustibile con 3 ppm di zolfo. Da queste prove, il CRT mostra 15°C in meno sul CDPF, mentre la configurazione di un ossidante e CDPF produce un miglioramento di 15°C in meno alla configurazione CRT.

La Johnson Matthey ha messo in commercio un CRT sotto il nome CCRT, dispositivo formato da un catalizzatore e un filtro catalizzato CDPF, entrambi ricoperti con il platino. Anche se la quantità di platino non è comunque superiore a quella utilizzata nel classico CRT, dal diagramma di figura 3.9, si può notare come questa variazione di configurazione porti ad un aumento dell'efficienza di ossidazione del soot.

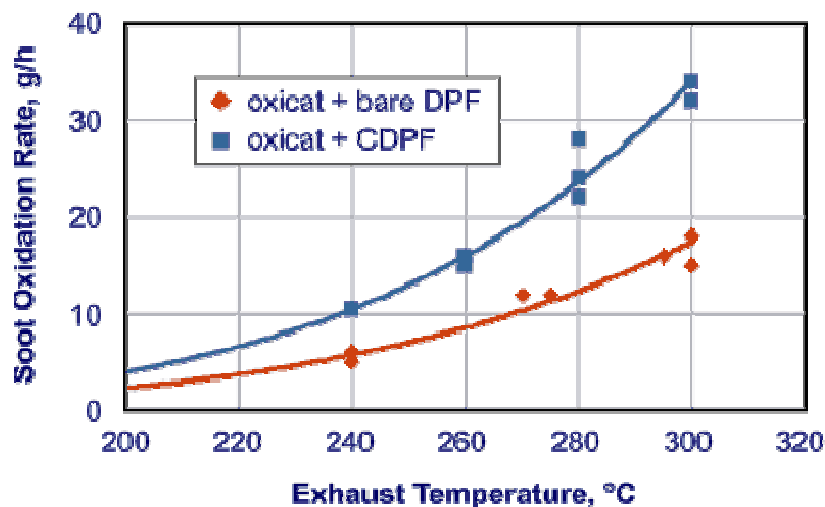


Figura 3.9: Confronto tra l'ossidazione del soot nel CRT e nel CCRT.

Il CCRT messo in commercio richiede una minore temperatura dei gas di scarico (sotto i 250°C) e un minor rapporto NO_x/PM (rapporto minimo=15).

Limiti di applicazione

La temperatura del gas di scarico, la quantità di NO_x/PM e il contenuto di zolfo sono i maggiori fattori che influenzano l'efficienza di conversione e la rigenerazione del CRT.

I limiti di applicazione sono:

- Temperatura dei gas di scarico $> 275^{\circ}\text{C}$;
- Contenuto massimo di zolfo nel combustibile 50ppm in peso;
- Rapporto NO_x/PM tra 8/1 – 25/1 in peso.

Questi valori dati dalla casa produttrice Johnson Matthey, sono dei valori di riferimento, infatti essi non tengono conto di condizioni reali di guida, variabilità di emissione in funzione del motore e fluttuazione dei parametri in funzione delle condizioni reali di funzionamento. C'è anche un certo trade-off tra questi parametri, infatti la temperatura dei gas di scarico può essere più bassa se il contenuto di zolfo diminuisce.

Per sostenere pienamente la fase di rigenerazione il CRT richiede un valore minimo di temperatura e il CARB per i retrofit dopo il 1994, richiede che la temperatura dei gas di scarico sia superiore ai 270°C per il 40% minimo del tempo di funzionamento con un combustibile con 15ppm di zolfo. Come si nota dal diagramma di figura 3.10, il filtro potrebbe rigenerarsi sotto i 300°C quando è alimentato con un combustibile a basso contenuto di zolfo.

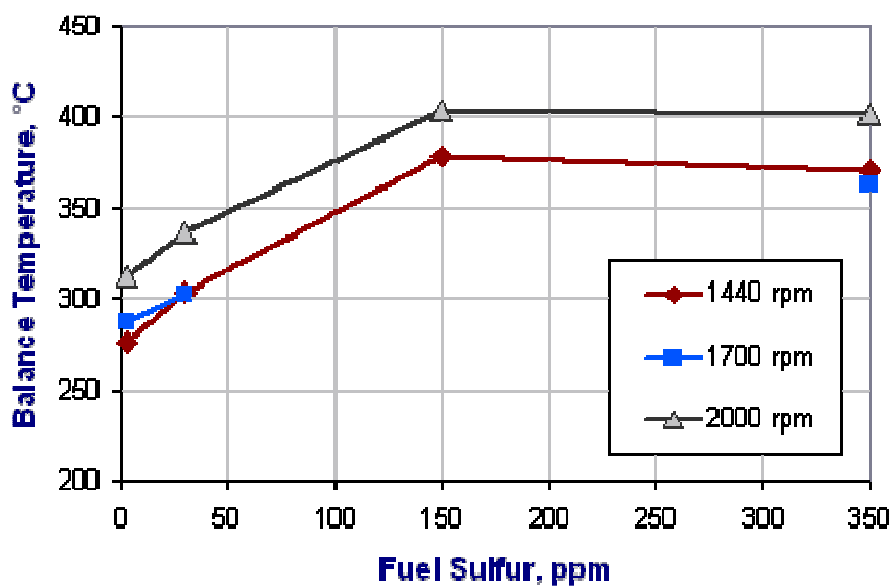


Figura 3.10: Temperature di bilancio in un CRT con combustibili diversi.

Finché viene usato un combustibile a basso contenuto di zolfo il CRT ha una temperatura di bilancio vantaggiosa rispetto al filtro catalizzato, ma visto che la temperatura di bilancio dipende da un numero elevato di parametri specifici, parametrizzare è difficoltoso.

Con un combustibile ad alto tenore di zolfo, il diossido di zolfo SO_2 prodotto, è in forte competizione con l' NO nel catalizzatore del CRT facendo diminuire la quantità di NO_2 prodotta e diretta nel filtro. Questo farà sì che la trappola per rigenerarsi richiederà una più alta temperatura.

Questa deattivazione causata dal contenuto di zolfo ha un carattere temporaneo, infatti il filtro riacquista la sua abilità a rigenerare quando opera per un lungo periodo con un combustibile a bassissimo contenuto di zolfo.

Un'importante limitazione all'uso del CRT è il rapporto NO_x/PM , infatti più alto è il rapporto NO_x/PM maggiore sarà la quantità di NO_2 prodotta e meglio funzionerà il filtro. Il minimo rapporto NO_x/PM può essere ricavato dalla stechiometria delle due reazioni. Se tutto l' NO è convertito a NO_2 il quale dovrebbe essere interamente riconvertito a NO durante la rigenerazione, il rapporto di NO_x/PM dovrebbe essere 3,83:1 (NO_x come NO_2 equivalente e il PM come carbone puro). In pratica non tutto l' NO è convertito a NO_2 e quindi non tutto l' NO_2 che era stato generato può essere utilizzato per la rigenerazione. Prima era richiesto il minimo NO_x/PM era 8:1, invece nella nuova letteratura sono considerati sufficienti rapporti 20:1 – 25:1.

Come abbiamo detto è formato da due parti: un catalizzatore ossidante e un filtro ceramico con flusso a parete. Per l'ossidazione catalitica ci sono 400 cpsi come substrato ceramico e per una migliore ossidazione di NO viene aggiunto platino e allumina al washcoat. La quantità di platino sui catalizzatori dei CRT è di circa $2,8 \text{ g/ft}^3$ ($2,86 \text{ kg/m}^3$). Il filtro per il particolato è un filtro non catalizzato di cordierite con flusso a parete con 100 cpsi (155039 celle/m^2) e 17 mm di spessore, ma possono essere usati altri materiali filtranti come monoliti di SiC o metalli sinterizzati.

Nei sistemi usati per retrofittare camion e bus di tecnologia Euro 0 - Euro 2, il volume del catalizzatore è uguale alla cilindrata mentre viene raddoppiato il volume del filtro.

All'interno del CRT ci sono 4 moduli: l'ingresso dei gas di scarico, il catalizzatore, il filtro e il

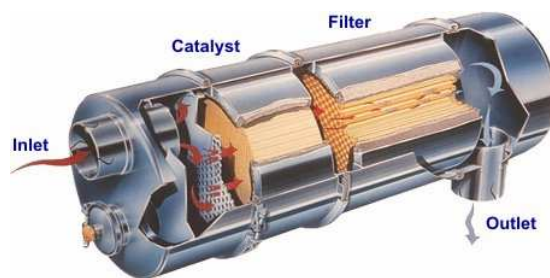


Figura 3.11: Vista interna di un CRT.

modulo di uscita. Inoltre ci può essere anche un apertura di sicurezza nel caso in cui vi sia una ostruzione del filtro.

Il design standard usa lo stesso diametro per il filtro e per il catalizzatore e la dimensione del sistema è simile a quello del silenziatore originale anche se il peso è più grande. Per aumentare la vita del dispositivo si soffia periodicamente via la cenere che si accumula all'interno del dispositivo.

Il CRT oltre a ridurre l'emissione di particolato, influenza le altre emissioni gassose: il CO e gli HC basati sui test fatti su motori diesel Euro 1 e Euro 2 si sono ridotti del 85–95% con test ECE R49, ESC e ETC, invece su test US-FTP, poiché la temperatura dei gas di scarico era più bassa, l'efficienza era del 70–90%.

In uno studio condotto su 50 bus serie 1999 DDC, c'è stata una riduzione maggiore del 90% per CO e HC, una riduzione del 99% dei carbonilici (aldeidi e chetoni, etc.), la riduzione dell'80% dei PAH e una riduzione dei nitro-PAH del 90%, tutti misurati con cicli sul banco dinamometrico del Central Business District CBD.

In figura 3.12 si vedono i valori di NO_x emessi da un bus equipaggiato con CRT e provato con diversi cicli. L'NO₂ può causare problemi quando per esempio nelle città c'è poco movimento d'aria e molti edifici questo perché rapporti di NO₂/NO_x sono di circa 20-60% quando si usa il CRT contro il 5% se i gas di scarico non sono trattati.

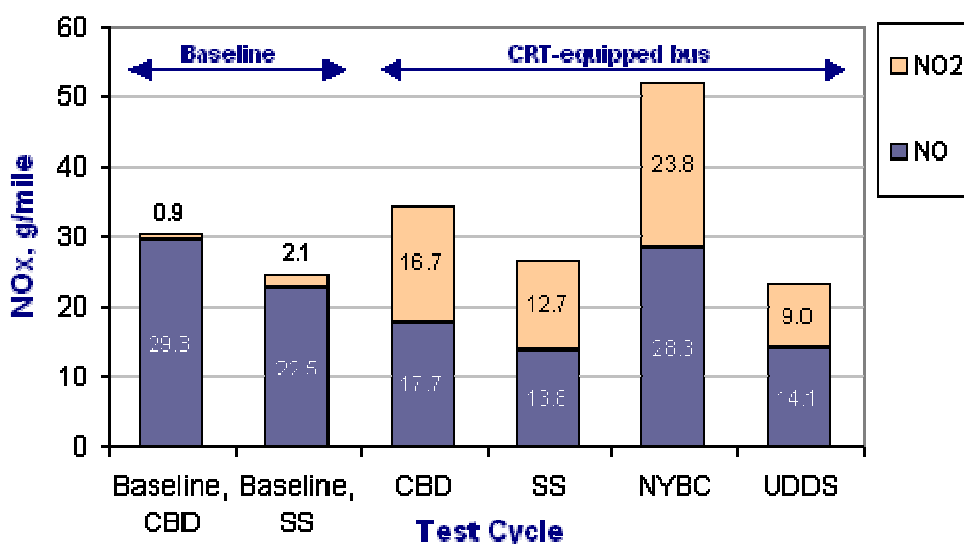


Figura 3.12: Effetto del CRT su un bus che percorre cicli diversi.

L'efficienza di riduzione del PM dipende dalla conversione delle tre frazioni del particolato diesel: carbone solido e cenere, SOF (idrocarburi pesanti) e particolato solfato. Utilizzando un CRT c'è un'efficienza del 95% per la parte solida e una ossidazione catalitica abbastanza efficiente per il SOF, per cui la performance del PM dipende dal solfato del particolato.

L'efficienza di filtrazione diminuisce con l'incremento del contenuto di zolfo nel combustibile e con l'incremento della temperatura dei gas di scarico del test. Ci sono dei risultati fatti con cicli ESC dove mediamente il carico è elevato e alta è la temperatura dei gas di scarico, per cui può essere svantaggioso l'uso del CRT. In numerosi studi usando del combustibile con 10–30 ppm di zolfo si ha una riduzione del PM di circa il 90%. Ciò rende possibile rientrare nelle restrizioni imposte dalle normative.

Hawker, P., et al. hanno condotto prove in condizioni stazionarie su un 6 cilindri Euro 2 iniezione diretta turbo compresso, 169 kW a 2400 g/minuto, vedi figura 3.13, il CRT contribuisce a diminuire il numero delle nanoparticelle.

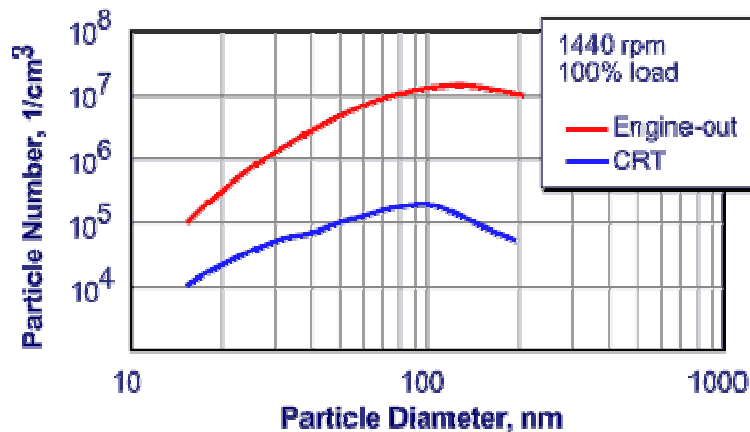


Figura 3.13: Distribuzione delle particelle con e senza un CRT.

Filtri catalizzati

La maggior parte dei filtri catalizzati utilizzano monoliti con flusso a parete con un substrato ricoperto. Il catalizzatore abbassa la temperatura di combustione del soot permettendo al filtro di autorigenerarsi durante il periodo in cui la temperatura dei gas di scarico è alta. Le trappole ceramiche catalizzate hanno una buona efficienza di filtrazione per il particolato ma sono caratterizzati da un'elevata contropressione dei gas di scarico.

I materiali principalmente usati sono la cordierite e la silicon carbide, mesh di fili, schiuma ceramica e fibre ceramiche, ma il più utilizzato è il monolite ceramico con il flusso a parete.

La trappola ceramica catalizzata è stata sviluppata all'inizio degli anni '90 e le prime applicazioni sono state sulle auto diesel e successivamente macchine per miniere. I primi filtri furono introdotti sulle auto vecchie della Mercedes (300SD e 300 turbo compresso) in California nel 1985, poi questo progetto fu abbandonato per problemi di durata, di contropressione e occlusioni delle celle. Oggi anche se tutti questi problemi non sono stati risolti, la trappola ceramica catalizzata resta una delle più importanti tecnologie. Infatti i CDPF sono utilizzati su un gran numero di heavy-duty come bus urbani e camion diesel municipali e per un certo numero di anni sono stati usati in miniere sotterranee e su alcuni motori stazionari.

Anche in questo caso il filtro ceramico, posto all'interno di un contenitore di acciaio, va a sostituire il silenziatore originale minimizzando così la contropressione e il rumore del motore.

La loro rigenerazione dipende dalla temperatura dei gas, quindi il dispositivo va installato il più vicino possibile all'uscita dei gas di scarico del motore. Per prevenire il raffreddamento dei gas di

scarico (10°C ogni metro di tubo), si utilizza isolare termicamente il tratto del tubo di scarico che precede il dispositivo.

Le misure del CDPF variano in funzione della tecnologia del motore, del ciclo di lavoro, della qualità del combustibile e da altri fattori fra cui la quantità di particolato emesso dal motore

Sistemi catalizzatori

I metalli catalizzanti utilizzati sui filtri, possono essere metalli nobili, misture di metalli nobili e metalli base. Il platino è il maggiore e più comune metallo nobile utilizzato, ma il palladio, rodio e loro misture sono altrettanto efficaci e la lista che non appartiene al gruppo del platino include il vanadio, magnesio, calcio, stronzio, bario, rame e argento.

Il modo più conveniente di applicare il catalizzatore al monolita ceramico è quello di impregnare con una base di acqua la soluzione dei precursori dei catalizzatori, facendo seguire un'essiccazione e una calcinazione. La catalisi finale (usualmente metalli o ossidi metallici) è formata dai precursori a elevata temperatura durante il processo di calcinazione. Lavorando con soluzioni di acqua si provvede a uniformare la distribuzione del catalizzatore sulle pareti porose del filtro. Alcuni filtri catalizzati sono anche ottenuti da sospensione in acqua di solidi metallici o sali. Quando sono usate le sospensioni, la distribuzione delle particelle sospese, così come altri parametri di processo, devono essere attentamente controllati per prevenire otturazioni dei pori del filtro del materiale catalizzante.

Il platino e il palladio sono compatibili con la cordierite e possono essere applicati senza un ossido di metallo di transizione o uno strato di washcoat, sebbene vari portatori di catalizzatori come l'allumina, la silice e lo zirconio vengono proposti. I filtri catalizzati con "pochi portatori", pur avendo una superficie fisica molto piccola dovuta anche ad una dispersione catalitica povera, sono soggetti a problemi di sinterizzazione o reazioni tra i componenti catalitici e il substrato ceramico.

Il carico di platino per i motori off-road negli anni '90, era compreso tra 35-50 g/ft³ (1,2-1,8 kg/m³). Questi motori che emettevano elevati inquinanti, richiedevano valori minimi di temperatura vicino ai 400°C per la rigenerazione. Successivamente quando i filtri catalizzati furono applicati a bus nuovi e veicoli stradali, si è visto che per la rigenerazione bastava un valore più basso di temperatura grazie anche ad un maggior carico di platino. In motori puliti, che lavoravano con temperature basse il carico di platino era di 50-75 g/ft³ (1,78-2,7 kg/m³).

Un esempio di catalizzatore con platino sviluppato dall'Engelhard è composto da 5-150g/ft³ (0,17-5,3 kg/m³) di Pt/Rh con un rapporto 5:1 e 30-1500 g/ft³ (1-53 kg/m³) di MgO. Il catalizzatore è impregnato su un monolita di cordierite attraverso una soluzione base di acqua e per la rigenerazione il filtro richiede una temperatura di 375-400°C. La funzione del rodio è quella di sopprimere l'ossidazione catalitica di SO₂ e quindi la produzione di solfato nel catalizzatore. Però

anche se si controllano i solfati, l'aggiunta di rodio al platino porta ad un incremento della temperatura necessaria per la rigenerazione. Però chi richiede un CDPF non vuole problemi di rigenerazione, accetta di controllare la produzione dei solfati nei filtri attraverso l'uso di gasolio con poco zolfo.

Anche il vanadio è uno dei più popolari metalli nobili usati per i filtri per particolato diesel. Il filtro commercializzato da Mercedes verso la metà degli anni '80 era ricoperto con pentossido di vanadio V_2O_5 e si rigenerava a 380-400°C.

Un problema del vanadio è la sua volatilità ad alta temperatura cosa possibile durante la rigenerazione. L'evaporazione può portare ad una diminuzione della catalisi e una diminuzione della vita utile del filtro, senza parlare dei problemi di emissioni dello stesso metallo.

L'efficienza di filtrazione dei filtri per frazioni solide di particolato, è determinata dalle proprietà del substrato del filtro e la maggior parte dei filtri per particolato utilizzano monoliti con flusso a parete che hanno un'alta efficienza per il particolato solido fino ad arrivare intorno al 95% quando lo strato di soot si stabilizza nei canali del monolite.

La differenza sull'efficienza di filtrazione totale dei filtri catalizzati (60 - 95%), può esser spiegata dall'attività dei filtri nei confronti della frazione non solida del particolato (il particolato solfato e la frazione organica solubile) che come già detto possono attraversare il filtro in fase vapore (specialmente ad alta temperatura) e non essere catturati.

Infatti ad alta temperatura il CDPF può generare solfato dall'ossidazione catalitica del gas da SO_2 a SO_3 . L' SO_3 prodotto può liberamente lasciare il filtro e successivamente si combina col vapore d'acqua e formare particolato da solfato a valle del dispositivo. Il solfato prodotto, può essere un grande problema per il filtro catalizzato quando sono usati combustibili ad alto contenuto di zolfo anche su bus con motori di nuova tecnologia. Infatti le trappole catalizzate possono anche incrementare il PM in uscita quando la quantità di solfato generato è tanto alta rispetto alla quantità di particolato intrappolato nel filtro.

L'efficienza di conversione del DPM di un filtro catalizzato con combustibili a diverso contenuto di zolfo è mostrato in figura 3.14. Su uno stesso motore (7,2 litri, 205 kW a 2200 g/min), sono stati eseguiti cicli diversi: caratterizzati da alta temperatura che favoriscono la formazione dei solfati.

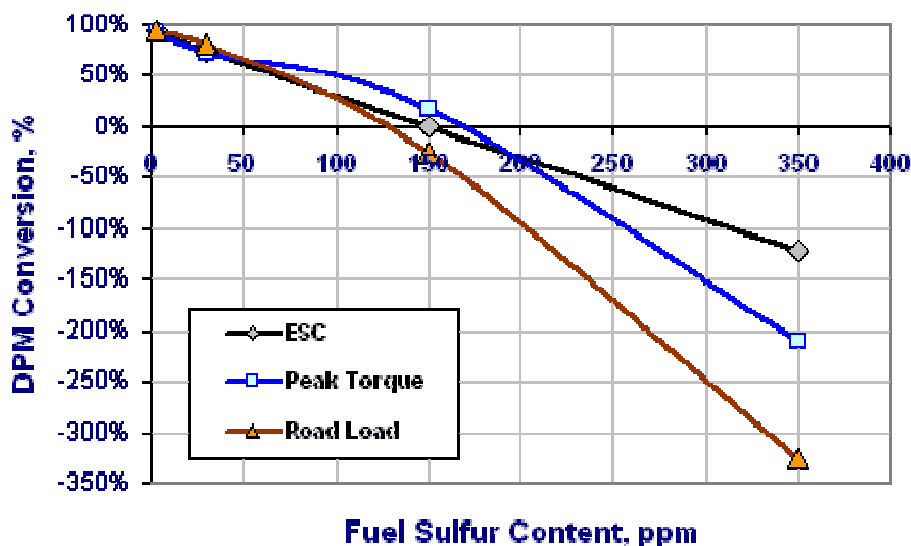


Figura 3.14: Efficienza di conversione di un CDPF.

Come si può notare se il contenuto di zolfo è basso, l'efficienza è alta e per i tre test si mantiene sempre sullo stesso ordine di grandezza, invece se il contenuto di zolfo è alto l'efficienza è negativa e cambia a secondo del tipo di prova che si fa.

Se si esclude il solfato dal DPM e si considera come particolato il carbone totale (carbonio inorganico + SOF, regolamento valido per le miniere) o il carbonio elementare (valido in Germania), i filtri mostreranno un'efficienza di filtrazione notevole, anche con combustibile ad alto contenuto di zolfo.

La performance del SOF dipenderà dalla temperatura e dall'attività del catalizzatore. Un catalizzatore attivo come il platino, ossiderà il SOF in fase vapore, invece con un catalizzatore poco attivo, il SOF in fase vapore passerà attraverso il filtro.

I CDPF sono molto attivi nella riduzione delle particelle nanometriche, però se le nanoparticelle sono in fase liquida, così come quando sono composte da acido solforico o idrocarburi, create attraverso la condensazione a valle del filtro, non potranno essere controllati dal CDPF. La formazione di nanoparticelle a valle del filtro aumenta con l'aumento del contenuto di zolfo nel combustibile e con la temperatura. In uno studio con un gasolio con 371ppm di zolfo e con un CDPF era stata trovata una diminuzione dell'80% del numero delle particelle con una modalità a bassa temperatura e un incremento del numero di particelle del 140% (stimando l'aumento del solfato del 300%) con una modalità ad alta temperatura.

Nei filtri catalizzati ci sono un numero di reazioni di ossidazioni della fase gassosa, però la loro riduzione dipende dal tipo di attività del catalizzatore. I catalizzatori con alto carico di platino ossidano molto bene sia il CO che gli HC, invece alcuni metalli base sono meno attivi nei confronti

della fase gassosa delle emissioni e quindi non modificano sostanzialmente le concentrazioni di CO e HC.

Il platino converte circa l'80-90% di CO. Infatti in un lavoro in cui si sono eseguite prove ESC con combustibili a diverso contenuto di zolfo, c'è stata una riduzione del CO del 95%. Durante la rigenerazione, ci potrebbe essere una temporanea mancanza di ossigeno portata dalla combustione del soot e in questo intervallo di tempo, potrebbe diminuire la performance del monossido di carbonio.

Il platino sul CDPF ossida anche HC di circa 60-70% come confermano vari studi.

Una leggera riduzione di NO_x viene misurata nei CDPF, probabilmente causata dalla ricircolazione interna dei gas di scarico dovuta all'incremento di contropressione nel condotto di scarico, piuttosto che da una reazione catalitica. Come per le altre ossidazioni catalitiche, i CDPF cambiano le proporzioni di NO_x (NO₂+NO) con l'incremento di NO₂ prodotto dall'ossidazione di NO. Sebbene non ci sia un cambio elevato di NO_x totali, questo fenomeno è visto come uno svantaggio, visto la sua tossicità e l'effetto sulla formazione di ozono. Da prove fatte su un banco dinamometrico, si nota che il CDPF incrementa la quantità di NO₂ dal 5% al 30% del totale di NO_x, valore confrontabile con quello misurato nei filtri CRT che producono il 26-34% di NO₂. I risultati della figura 3.15 sono stati ottenuti da due bus che percorrono lo stesso ciclo e alimentati dallo stesso combustibile.

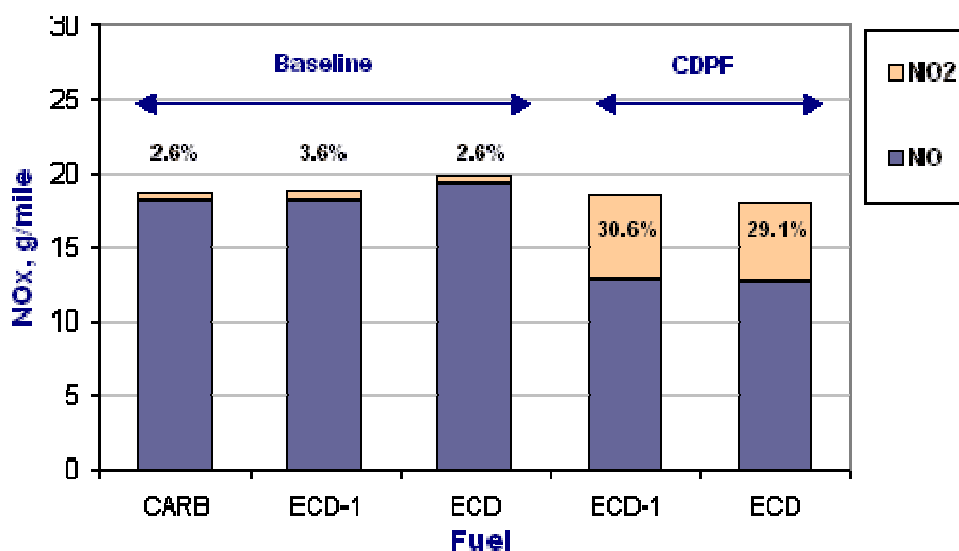


Figura 3.15: Effetto degli NO_x su due bus con CDPF.

La conversione delle aldeidi è più alta degli HC e può superare il 90%, mentre per i PAH a valle del CDPF variano tra il 40 al 97% in funzione del tipo di PAH e del tipo di prova effettuata.

Rigenerazione e contropressione

L'esatto meccanismo della rigenerazione catalitica non è perfettamente conosciuto, ma un processo eterogeneo catalitico accade nella fase gas a contatto con la parte solida del catalitico. Certamente le particelle solide di particolato, di diversi ordini di grandezza e pesantezza rispetto alle molecole gassose, hanno una diversa mobilità fisica a contatto con il catalizzatore. Inoltre, solo quelle particelle che si sono depositate dentro la rete porosa catalizzata o direttamente sulla superficie del muro dovrebbero avere qualche chance ad essere ossidate e quindi quelle particelle che formano strati dentro le pareti dei canali possono non venire in contatto con il catalizzatore. Un numero di meccanismi probabilmente accadono nella rigenerazione:

- Ossidazione catalitica dall'ossigeno - le particelle sono ossidate dagli atomi di ossigeno assorbiti sul catalitico e questo meccanismo è limitato a quelle particelle che vengono in contatto fisico con il catalitico. Ossidazioni di strati di particelle all'interno dei canali dovrebbero richiedere che il soot depositato venga rimosso dal filtro attraverso l'impatto del flusso di gas e ossidati dai prodotti gassosi.
- Ossidazione da diossido di azoto – Come abbiamo detto l' NO_2 che viene generato dall' NO nel filtro, ossida il soot ad una temperatura più bassa dell'ossigeno. In un CDPF questo meccanismo si dovrebbe applicare principalmente a particelle posizionate molto a valle del catalizzatore, generalmente dentro il poro della rete. Ossidazione dello strato di soot all'interno dei canali a monte del catalizzatore dovrebbe essere affidato ad un trasferimento diffusionale di NO_2 controcorrente al flusso di gas. L'effetto di NO_2 che viene usato nella sua piena potenzialità nel CRT è bloccato dallo zolfo, per cui per un CDPF è richiesto un combustibile a basso contenuto di zolfo.
- Ossidazione termica da ossigeno - L'ossidazione catalitica degli idrocarburi e di altre specie gassose così come il particolato carbonioso, creano zone di temperatura elevate dovute alla reazione esotermica. Questo incremento di temperatura può essere sufficiente per l'ossidazione del soot depositato in un dispositivo non catalitico. Questo tipo di ossidazione è certamente un fenomeno importante durante una rigenerazione incontrollata dove la temperatura supera i 1000°C

La temperatura dei gas di scarico è il fattore più importante che influenza la rigenerazione del filtro e la quantità di soot che si ossida aumenta con l'aumentare della temperatura del filtro. Se la temperatura è molto bassa il soot si accumula nel filtro causando una restrizione al flusso dei gas, un aumento della contropressione dei gas ed eventualmente una chiusura delle celle. Le unità sovraccaricate di soot sono anche soggette ad incontrollate rigenerazioni, che possono causare una

improvvisa ignizione del soot accumulato nel CDPF causando una rottura meccanica del substrato del filtro (fusione, cracking).

In generale la temperatura minima richiesta per ottenere un'adeguata auto rigenerazione del CDPF varia tra i 320-420°C, ma è importante che questa temperatura venga mantenuta per un 30% del tempo totale del suo ciclo di lavoro.

Per applicazioni su motori non stradali del '90 si richiedevano temperature di circa 400°C per il 25% del loro tempo di impiego normale. Basse temperature sono richieste per motori molto puliti e quindi di nuova generazione con combustibili a basso contenuto di zolfo. Un retrofit utilizzato su bus della California del '94 con combustibile a basso contenuto di zolfo è stato quello della Engelhard che richiedeva per il proprio filtro una temperatura molto bassa: 225°C. Il filtro DPX era stato posto su un bus ibrido diesel-elettrico nella città di New York City in estate. Questo filtro caricato con valori alti di PM, lavorava in piena estate e quindi la temperatura dei gas era sicuramente superiore ai 300°C. E' bene ricordare che un bus ibrido è caratterizzato da basse emissioni di PM grazie all'assenza di rapide accelerazioni proprio perché è un mezzo ibrido.

La temperatura di bilancio del filtro DPX è stato misurato in laboratorio su un motore (con le caratteristiche del motore di figura 3.14) non da strada, con valori alti di PM in funzione del contenuto di zolfo.

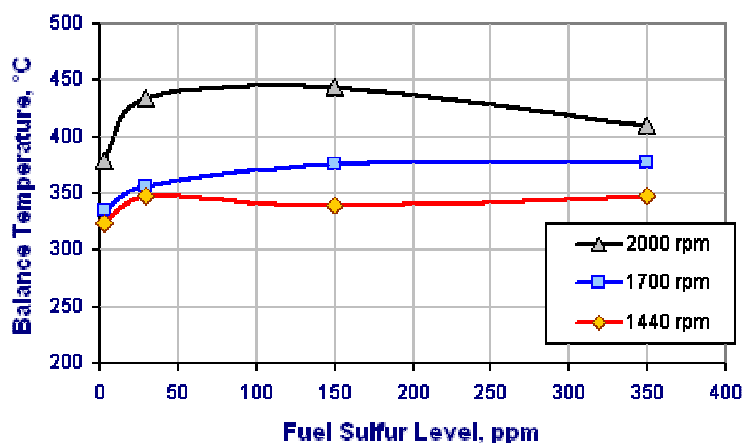


Figura 3.16: Temperatura di bilancio in funzione del contenuto di zolfo e di giri in un CDPF.

La temperatura di bilancio determinata in laboratorio, anche se è un'approssimazione della temperatura che si ha in strada, mostra la variazione del punto di bilancio in funzione di alcune variabili:

- Motore, emissione di PM -
- Contenuto di zolfo nel combustibile - diminuendo il contenuto di zolfo da 30 a 3ppm la temperatura di bilancio diminuisce di circa 30°C e resta quasi costante quando il contenuto di zolfo supera i 30ppm;

- Velocità dei gas di scarico - aumentando la velocità del motore e di conseguenza la temperatura del flusso dei gas, la temperatura di bilancio aumenta. Questa cosa potrebbe suggerire che filtri più grandi possono rigenerare a temperature più basse. Comunque incrementando la misura del filtro oltre un certo valore, è probabile che si deteriori la sua capacità di rigenerare per effetto della diminuzione della sua capacità a riscaldarsi utilizzando spikes di temperatura.

In un'applicazione ad alta temperatura la rigenerazione del filtro è praticamente continua e quindi la fase di carico e quella di rigenerazione non sono separate, la quantità di DPM ossidata nella trappola è uguale alla quantità che entra nella trappola. Dalla figura 3.17 si vede che la contropressione e la temperatura nel filtro vanno paralleli in funzione del tempo. La temperatura era superiore ai 450°C e la corrispondente contropressione era sui 5kPa.

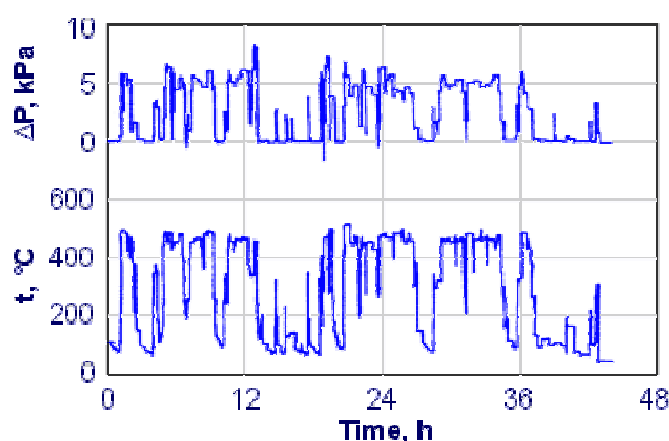


Figura 3.17: Temperatura e contropressione in un CDPF – applicazione alta temperatura.

Applicazioni con basse temperature danno differenti rigenerazioni e contropressioni. Il soot che si è accumulato durante le basse temperature si rigenera rapidamente quando la temperatura aumenta, dando luogo a periodiche rigenerazioni. Dalla figura 3.18 si vede che la fluttuazione della contropressione sono una chiara spiegazione della periodica rigenerazione.

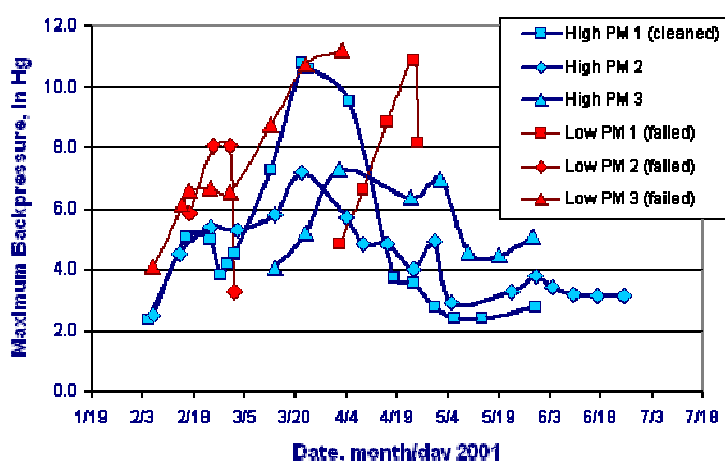


Figura 3.18: Contropressione in un CDPF – applicazione bassa temperatura.

Alcune periodiche rigenerazioni possono causare un'incontrollata rigenerazione, questo accade quando il soot viene bruciato durante una momentanea fase di alto carico. Se la velocità del motore va al minimo dopo che il soot brucia, il flusso di gas, che in questa nuova fase è una quantità piccola, è costretto a portare il calore rilasciato dalla reazione facendo aumentare la temperatura interna del filtro e/o il gradiente di temperatura è tale da danneggiare il substrato del filtro. Dei sei filtri del diagramma, tre si sono rotti per incontrollate rigenerazioni. I filtri rotti erano a basso contenuto di metallo prezioso.

Comunque tutti i filtri non rotti sono stati smontati dopo i sei mesi di utilizzo per pulizia visto che la contropressione aumentava. Nei mesi invernali di utilizzo (febbraio, marzo) la temperatura dei gas di scarico della maggior parte dei bus era sui 300°C solo il 10% del tempo e la rigenerazione del filtro era stata osservata una volta sola. Invece durante i successivi mesi estivi, il 10% del tempo di corsa dei bus oscillava intorno ai 325°C.

La contropressione, se il dispositivo va bene, e quindi rigenera ad alta temperatura è di circa 5kPa, invece quando ci sono problemi di basse temperature la contropressione può eccedere i 20kPa. La contropressione può comportare un aumento del consumo di circa il 2–4%. Valori di 2% sono associati a test caldi su motori al banco. Su una media di prove ESC fatte, c'è stato un aumento di consumo di circa 0,5%.

Filtri con additivi per la rigenerazione

Gli additivi nei combustibili, prima erano studiati per sopprimere il fumo dei motori diesel e migliorare il numero di cetano del gasolio. Successivamente diversi metalli come Ba, Ca, Fe, Ce e Mn, sono stati usati per abbassare la quantità di soot che si forma durante la combustione dei motori. Questo effetto è dovuto alla combinazione dei seguenti meccanismi:

- Ioni o radicali di metalli alcali o alcalini, usati come additivi, rimuovono i precursori delle particelle;
- Gli ioni o radicali, inibiscono la nucleazione dei precursori delle particelle;
- Alcuni metalli in transizione catalizzano l'ossidazione del particolato ad uno stadio successivo il processo di formazione del soot.

Il Ba e il Ca, si pensa che lavorino sfruttando i primi due meccanismi.

L'interesse comune sull'uso degli additivi è da ricercarsi nella loro capacità di ossidare il soot del particolato accumulato sui filtri in motori che hanno una certa età. Però bisogna porre una certa attenzione ai problemi di salute derivanti dall'emissione allo scarico di particelle metalliche. In vecchi motori, utilizzando combustibili con additivi metallici, (per esempio con 10-100ppm di Fe o Ce) ci potrebbero essere riduzione di PM di 30-40% e una riduzione nei consumi del 10%. Invece nei motori di nuova generazione EURO 3, l'effetto di riduzione dell'emissione e dei consumi, non è

tale da giustificare l'utilizzo degli additivi. Utilizzando in quest'ultimo caso gli additivi al combustibile, il metallo viene emesso dal motore come ossido di metallo (cenere) nelle dimensioni di nanoparticelle, anche se la massa delle particelle è piccola. Le autorità governative pongono molta attenzione all'uso nel combustibile degli additivi metallici, a meno che non ci sia un'alta efficienza del filtro a trattenere anche le particelle di cenere metallica.

Quando questi catalizzatori solubili nel combustibile vengono bruciati nel cilindro del motore, il suo componente metallico lascia la camera di combustione come ossido di metallo o componente inorganico (per esempio solfato) e forma particelle all'interno del particolato sul filtro, in modo uniforme.

Il meccanismo della rigenerazione è simile a quello del filtro catalizzato, ma l'uso degli additivi che permettono un migliore contatto tra il carbonio del particolato con il catalitico, richiede una temperatura di rigenerazione più bassa. In una applicazione light-duty però c'è la necessità di un approccio quasi-attivo o passivo-attivo per la rigenerazione del filtro.

Sebbene ci siano molti lavori sui filtri per motori diesel con additivi per la rigenerazione, ci sono meno informazioni sull'interazione fra l'additivo e il particolato diesel, il meccanismo catalitico, la misura delle particelle dell'additivo e la loro distribuzione dentro le particelle del particolato.

L'additivo del combustibile, componente organometallico, è distrutto dall'ossidazione durante il processo di combustione e la loro esatta formulazione chimica dal punto di vista catalitico, è di limitata importanza. Gli additivi usati principalmente sono: grasso di sapone acido, sulfonati, carbonati, naftenati etc. Sono stati testati anche dieci componenti tra alcali e metalli nobili come: sodio, litio, calcio, bario, manganese, ferro, nichel, cerio, rame, piombo, argento vanadio, platino etc, aggiunti al combustibile in concentrazione di 100ppm in peso del metallo usato. La quantità dell'additivo dipende dall'additivo, dalla temperatura del gas di scarico e dalla composizione del particolato emesso. Generalmente alte concentrazioni di additivo si utilizzano per abbassare di più la temperatura di rigenerazione. Esistono prodotti venduti o ancora in fase di certificazione e il loro uso richiede una formale approvazione o certificazione. In USA è richiesto che l'additivo usato sia registrato dall'EPA per essere usato on-road, invece non è possibile usarlo su motori che lavorano off-road, per esempio nelle miniere sotterranee.

Di seguito è indicata una serie di problemi che si hanno usando il combustibile additivato:

- La necessità di introdurre il catalitico al combustibile - per le stazioni di rifornimento, non è semplice additivare il combustibile. Potrebbero esserci dei serbatoi che vengono riempiti ogni tanto e dei sistemi di mescolamento automatici presenti sul veicolo, ma questo andrebbe a incidere sulla complessità del sistema e sul costo dell'intero dispositivo;

- Cenere depositata sul filtro - la maggior parte dell'additivo è intrappolata sul filtro sotto forma di ossido inorganico e/o sale e con il tempo la quantità va ad aumentare incrementando la contropressione;
- Emissione di ceneri - la cenere dell'additivo che non è bloccata dal filtro, dovuta ad una limitata efficienza di filtrazione o rottura del filtro, viene emessa in atmosfera con conseguenza sull'ambiente e sulla salute umana;
- Impatto sull'emissione del motore - gli additivi possono far migliorare o peggiorare le sostanze gassose e il particolato emessi dal motore, in più gli additivi possono far emettere altre sostanze;
- Impatto sul motore e suoi componenti - gli additivi possono cambiare le proprietà del combustibile come per esempio la viscosità, influenzando l'iniezione. Alcuni additivi, visto che causano problemi di usura al sistema di iniezione, ha spinto, a richiederne l'approvazione per l'uso ai costruttori dei motori;
- Stabilità del combustibile - mescolando l'additivo al combustibile, ci possono essere formazioni di depositi, incremento di sedimentazione del combustibile stesso e/o incremento di formazione di deposito quando si trova acqua nel combustibile additivato.

Un esempio di mal funzionamento del sistema di rigenerazione del filtro con additivi, è avvenuto in Germania, dove diversi sistemi erano stati installati su camion elevatori di 6 tonnellate 85 kW a 2200 g/min, con combustibile con meno di 50ppm di additivo. Dopo 2000 ore di lavoro, a bassa potenza, il motore emetteva molto fumo e da un'analisi più attenta si notava che diversi fori del sistema di iniezione erano completamente ostruiti da depositi: figura 3.19.

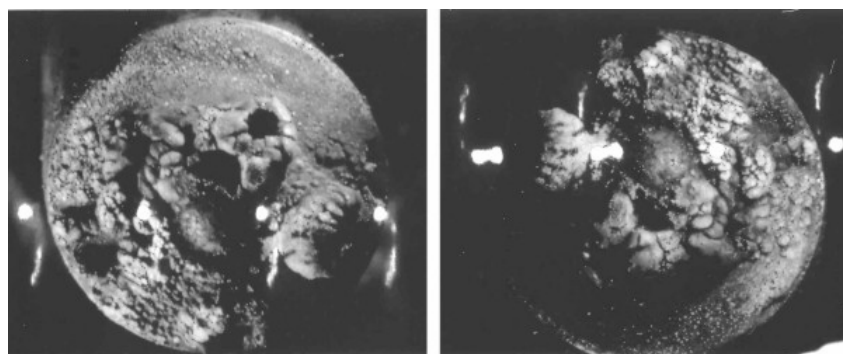


Figura 3.19: Contaminazione dell'additivo sulla punta degli iniettori.

Di seguito una breve descrizione delle sostanze utilizzate come additivi.

Ferro

Il ferro nella forma di ferrocene, commercializzato per migliorare la combustione e quindi migliora l'economia dei consumi, è anche usato come additivo al combustibile per la rigenerazione dei filtri di particolato.

La molecola è formato da un atomo centrale di ferro legato con due anelli simmetrici di ciclopentano. Per la rigenerazione del filtro bastano circa 18ppm in peso di Fe e 60ppm in peso di ferrocene.

Fe/Sr

Un altro additivo studiato è stato quello introdotto dalla Octel, che ha come componenti base ferro e stronzio. Le percentuali di questo additivo vanno tra 10 e 200ppm in peso e sono stati provati in laboratorio su macchine da collaudo. La Octel stava sviluppando anche un additivo con componenti Sr-Na, che avevano una buona capacità di ossidare il soot, però danneggiava i filtri di cordierite e i filtri di fibre.

Cerio

Il cerio come additivo sviluppato da Rhodia e commercializzato come Eolys, è biologicamente inerte e non è tossico.

Su alcuni motori heavy duty sono stati posti dei filtri passivi con combustibili additivati di 100-120ppm in peso di cerio per la rigenerazione. Invece la Peugeot dal 2000, sull'auto Peugeot 607, utilizzava quantità più basse di cerio 25ppm in peso e una strategia di combustione del motore per incrementare la temperatura dei gas di scarico a 450°C necessaria per la rigenerazione.

Si è visto che quantità minime di ferro aggiunto al cerio, migliora le capacità catalitiche di quest'ultimo facendo diminuire le quantità di cerio da aggiungere al combustibile. Inoltre in uno studio di compatibilità tra cenere di ossidi metallici e materiale filtrante, rileva che con l'uso del cerio ci sono meno problemi di deterioramento delle pareti del filtro di cordierite.

Platino

La Clean Diesel Technologies ha introdotto un additivo al platino Platinum Plus. In uno studio condotto nell'Università di Delft, si è utilizzato il platino e il cerio come additivi per un filtro pre-catalizzato con platino. Utilizzando queste sostanze come additivi, la quantità di cerio diminuisce, infatti bastano solo 5ppm di Ce per far avvenire la rigenerazione del filtro a circa 340°C.

Rame

Il rame come additivo per la rigenerazione dei filtri, è stato lungamente testato da Lubrizol ed è usato anche nel programma VERT. Le quantità di rame sono circa 60ppm in peso, ma questo additivo è responsabile dell'emissione secondaria di diossina rendendolo meno interessante rispetto agli altri additivi. Inoltre come alcuni additivi, è responsabile della contaminazione degli iniettori, problema che è stato poi risolto con iniettori placcati d'oro.

Confronto tra gli additivi

La società 3M ha testato un filtro della Nextel con tre additivi (Cu, Fe e Ce). Lo studio è stato realizzato in laboratorio con il motore heavy duty al banco e su strada con gli stessi additivi. Il filtro di fibre avvolte era di 140mm di diametro e 1270mm di lunghezza. Il motore è stato fatto funzionare per un certo tempo con un profilo di velocità-carico tale da permettere al filtro di caricarsi di soot e poi veniva forzato a rigenerarsi cambiando velocità-carico per un certo intervallo di tempo. Dal diagramma di contropressione, si nota che l'additivo rame promuove facili rigenerazioni, il ferro promuove rigenerazioni più lentamente e il cerio è tra i due come comportamento.

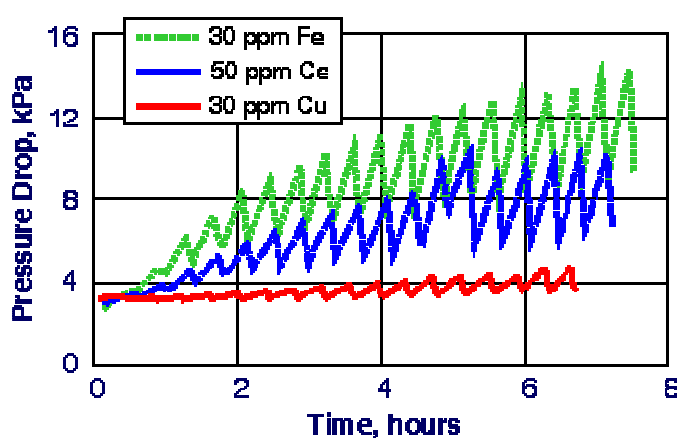


Figura 3.20: Comportamento del ferro, rame e cerio come additivi.

Successive prove di laboratorio, hanno rilevato che l'additivo va ad influenzare la modalità di rigenerazione. Quando il motore veniva fatto funzionare in una condizione costante e quindi temperatura dei gas di scarico costante, l'additivo rame aveva la tendenza a far accumulare il soot sul filtro e poi veniva rapidamente combusto facendo rilasciare al filtro picchi di elevata temperatura. Il ferro e il cerio invece, promuovevano continue rigenerazioni, cioè una quantità di soot entrava nel filtro e la stessa quantità veniva ossidata, senza quindi avere elevati picchi di temperatura.

Prove successive in laboratorio fatte sullo stesso filtro della Nextel, con il rame come additivo, mostrava che il filtro aveva un'efficienza di filtrazione della cenere tra il 95-99% e non si notava alcun deterioramento delle fibre. Invece facendo prove su strada, dopo circa 30.000 Km, si notava fumo dallo scarico. Analizzato il filtro si è visto che la cenere del rame produceva un ricoprimento appiccicoso sul filtro ostruendo il passaggio e facendo legare tra di loro le fibre del filtro. Un'analisi più attenta delle fibre, confermava che l'alta temperatura durante la rigenerazione causava una smaltatura delle fibre a causa della cenere dell'olio e del rame facendo poi legare insieme le fibre che assumevano un aspetto vitreo e fragile. Lo stress meccanico e termico causava poi il danneggiamento del filtro.

Nel 1994 l'EPA ha condotto una sperimentazione su un motore diesel heavy duty turbo compresso, 5,9 litri, 119kW a 2500 g/min, equipaggiato con un dispositivo filtrante costituito da tre cartucce di fibre una dentro l'altra e come additivo 4ppm di ferro.

Il motore veniva testato per 1000 ore ripetendo un ciclo di 1 ora. Questo ciclo era composto:

- 20 ripetizioni di un ciclo urbano (54% costituito da duty cycle);
- 2 tratti a velocità costante (7 minuti a coppia massima e 8 minuti a una certa velocità).

Nella figura 3.21 viene diagrammato la contropressione al filtro e la massa di cenere e soot sul filtro nelle 1000 ore di test.

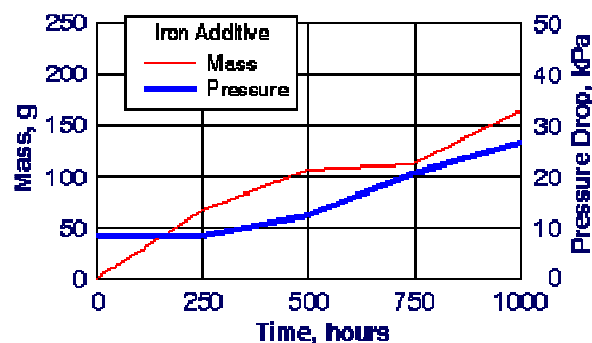


Figura 3.21: Andamento della contropressione e cenere su un filtro con combustibile additivato.

Alla fine delle prove si verificava che il filtro dopo una fase iniziale, mostrava un'efficienza di filtrazione del 90% che era leggermente più alta quando funzionava in condizioni costanti. Il filtro rigenerava in modo appropriato e da un'analisi fatta alla fine delle prove, non c'erano danneggiamenti o materiali appiccicosi sulle fibre. Dall'analisi della cenere si notava che questa si smaltiva dopo i 900°C e visto che la cenere al suo interno nel filtro non era vetrificata, si può concludere che il filtro rigenerava a una temperatura più bassa. Dopo una fase iniziale di 250 ore, l'incremento di pressione sul filtro era dovuto all'accumulo di cenere dell'olio e del ferro e da un'analisi successiva, il 43% del totale di deposito trovato nel filtro era dovuto all'additivo usato. Dopo le 1000 ore di prove si notava un incremento del 14% di particolato emesso dovuto all'incremento della contropressione. Il consumo di combustibile subiva un leggero aumento di 0,85% durante il test.

Un test su strada su 5 bus motorizzati MAN è stato fatto in Romania. Questi bus avevano cartucce di filtri della Nextel e 30ppm di ferro come additivo. Dopo 17 mesi di normale esercizio, la flotta di bus aveva accumulato mediamente 80.000 Km. In questo intervallo di tempo, solo un dispositivo si era rotto e sugli altri alla fine di questo periodo venivano controllati dei parametri tra cui: fumosità con e senza dispositivo, temperatura ingresso uscita del dispositivo, contropressione, rumore e variazione del consumo di combustibile.

Prove fatte in laboratorio con 12ppm di cerio come additivo, sono state eseguite molto similmente a quelle fatte con il ferro. Dalla curva di contropressione registrata durante le 700 ore di funzionamento, si notava che la contropressione subiva nella fase iniziale una brusca variazione.

Si può concludere che il filtro dopo una fase iniziale, aveva un'efficienza di filtrazione del 90%. Il filtro rigenerava propriamente e da un'analisi condotta alla fine delle 700 ore, si notava che lo strato di cenere sul filtro era materiale sfaldato dalle fibre. Visto che non si era trovato cenere vetrificata nel filtro, la rigenerazione avveniva a temperatura inferiore di 900°C come per il ferro. La cenere del cerio era trattenuta dal filtro con un'efficienza del 90,5%. L'aumento della contropressione e della massa di cenere che si accumulava, era principalmente dovuto alla cenere dell'additivo e dell'olio. Il 55% di materiale incombusto trovato, era causato dalla cenere dell'additivo. Dopo le 700 ore di funzionamento in laboratorio, il dispositivo faceva diminuire l'emissione del particolato del 21% anche se c'era un discreto aumento di contropressione, inoltre si era notato un 4,7% di aumento del consumo di combustibile.

Filtri con bruciatori per la rigenerazione

Un bruciatore di combustibile può essere usato per incrementare la temperatura dei gas di scarico al valore di 650°C necessaria per la rigenerazione della trappola su cui si è accumulato il soot. Anche se il bruciatore può essere alimentato per esempio da propano, il gasolio è la scelta più obiettiva visto che è disponibile sul veicolo.

Questi sistemi che usano poca energia, possono riscaldare l'intero flusso di gas di scarico, oppure solo una parte del gas di scarico facendo baypassare il restante dal filtro. Ci sono sistemi che per la rigenerazione richiedono che il motore funzioni ad un certo regime, altri invece richiedono che il motore stia al minimo durante la rigenerazione. Si possono quindi distinguere due categorie di bruciatori:

- Bruciatori single point;
- Bruciatori a flusso pieno.

Il primo sistema fa accumulare soot nel filtro facendo aumentare la contropressione che viene continuamente monitorata. Quando la contropressione supera un valore di soglia, si accende una luce che indica che il sistema filtro ha necessità di rigenerarsi. L'operatore mette il motore al minimo e fa iniziare la rigenerazione che dura circa 15-20 minuti. Con il motore al minimo, il dispositivo sa' quanta energia è necessaria per bruciare il soot accumulato sul filtro.

Questo sistema single point offre poche possibilità di applicazioni, per esempio viene utilizzato per le flotte di carrelli elevatori, in quanto per applicazioni su strada, imporrebbe all'autista del mezzo di fermarsi per quei minuti necessari per la rigenerazione del filtro.

I bruciatori a flusso pieno, sono sistemi che in automatico rigenerano il filtro durante il normale funzionamento del veicolo. La fase di accumulo è uguale a quella del single point e quando la contropressione creata dal particolato raggiunge un valore di soglia, il sistema è in grado di rigenerarsi in automatico controllando istante per istante le condizioni di funzionamento del motore e l'energia necessaria da dare ai gas di scarico per la rigenerazione. Finito l'operazione di rigenerazione il bruciatore si spegne e il filtro riprende un nuovo ciclo di carico. Il sistema a flusso pieno richiede però un'unità di controllo elettronico abbastanza complessa per tenere termicamente bilanciata la rigenerazione e minimizzare lo stress termico al filtro. Per bilancio termico si intende l'energia termica prodotta dal bruciatore in funzione: del carico di soot del filtro, delle condizioni del motore in quel intervallo di tempo e quindi delle condizioni dei gas di scarico. L'unità controlla che la temperatura sulla faccia del filtro segua un profilo di temperatura memorizzata all'interno del sistema.

Con il bruciatore c'è un certo consumo di combustibile, ma questo sistema assicura che la contropressione risulta sempre essere al di sotto di un certo valore e rispetto a tutti gli altri sistemi passivi di rigenerazione. Un altro problema di questo sistema è che durante la rigenerazione c'è un'emissione secondaria generata durante la rigenerazione, problema può essere trascurato se si considera l'efficienza del sistema.

Un sistema filtrante con bruciatore per motori heavy duty è stato sviluppato da Zeuna. L'intervallo di rigenerazione del monolita filtrante, dipende dal livello di PM emesso dal motore e dalla misura del filtro. Un sistema di controllo elettronico controlla le condizioni del filtro attraverso dei sensori e li processa insieme con i dati del motore. Quando certi parametri raggiungono dei valori di soglia, la rigenerazione inizia in automatico attivando dei componenti contenuti nel box.

Il combustibile per la rigenerazione, pompato dal serbatoio e mescolato con aria compressa attraverso un compressore d'aria è iniettato in camera di combustione e acceso da un elettrodo: figura 3.22. Queste fasi, indipendenti dalle condizioni di funzionamento del motore, fanno in modo che la temperatura della fiamma segua un profilo memorizzato nell'unità di controllo attraverso la modulazione della valvola di iniezione.

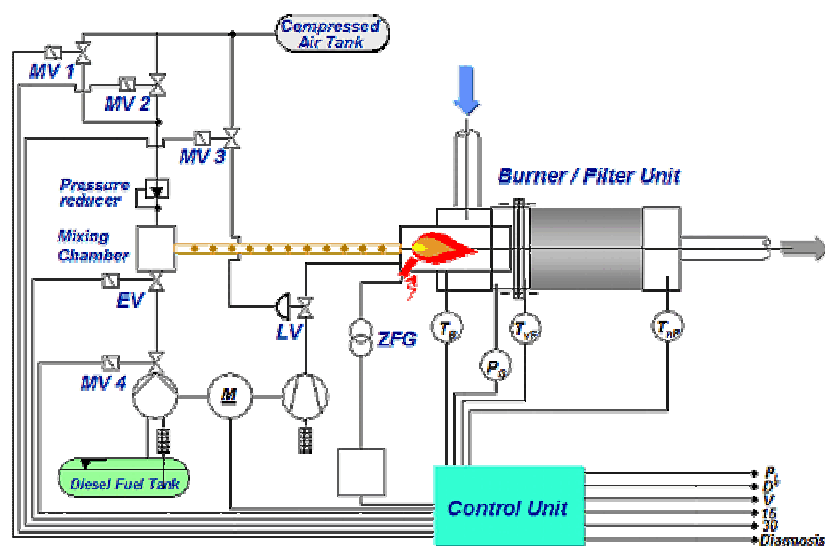


Figura 3.22: Filtro con bruciatore a flusso pieno della Deutz.

Un componente critico per il filtro a flusso pieno è il sistema integrato bruciatore/filtro particolato. Un sistema creato dalla Deutz è il DPFS II introdotto a partire dal '94 per retrofittare bus, veicoli municipali, motori industriali e motori stazionari. Centinaia di filtri erano stati montati e avevano accumulato 6000 ore di funzionamento per i motori industriali e 160.000 Km per i bus. Esistevano solo due misure di dispositivi che soddisfacevano potenze di 70-500 kW ed erano formati da un unico blocco comprendente filtro e bruciatore. Il combustibile atomizzato attraverso l'aria compressa entra in camera di combustione attraverso un iniettore controllato elettronicamente a 100 Hz per gestire la potenza del bruciatore in funzione del funzionamento del motore. Il primo sistema DPFS I aveva avuto problemi di contaminazione dell'aria necessaria per la fiamma del bruciatore e questo richiedeva una manutenzione ogni 500 ore di funzionamento. Però anche facendo la manutenzione programmata avvenivano delle rigenerazione run-away che causavano il danneggiamento del filtro. Se non si faceva la manutenzione capitava che il sistema non rigenerava causando un sovraccarico del filtro. Nel nuovo sistema questi problemi non accadono più grazie ad un sistema che automaticamente pulisce il bruciatore e alla sostituzione periodica del sistema di accensione della fiamma. Anche in quest'ultimo sistema la rigenerazione del filtro è controllata da un ECU (Electronic Control Unit) che monitora le temperature di quattro termocouple opportunamente disposte per mantenere un profilo di temperatura sulla faccia del filtro come quella memorizzata nell'unità di controllo. Il carico di soot sul filtro dipende dal tipo di motore, dal livello di manutenzione del motore e dal tipo di ciclo.

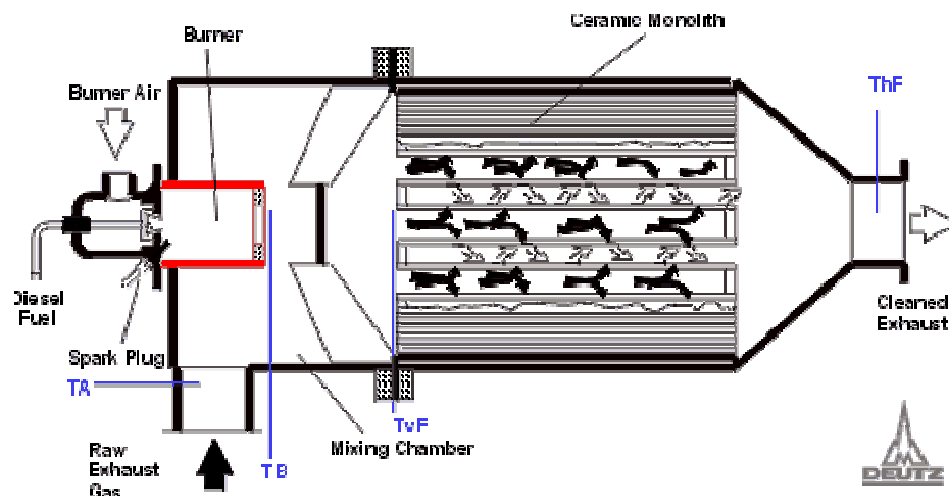


Figura 3.23: Filtro con bruciatore a flusso pieno della Deutz.

Per attivare l'inizio della rigenerazione l'unità di controllo deve conoscere il fattore di carico. L'ECU determina la condizione di carico del filtro confrontando la velocità del motore e leggendo la contropressione rispetto ai valori posti in memoria. Più precisamente l'ECU si calcola la quantità di soot attraverso il monitoraggio del motore e confrontandola con la mappa memorizzata.

La performance di emissione viene illustrata in figura 3.24 che ha in ordinate una scala logaritmica. In sintesi possiamo dire che c'è una riduzione del particolato del 90%, una riduzione della parte carboniosa del 99% e una riduzione dell'emissione delle nanoparticelle oltre che di sostanze non regolamentate.

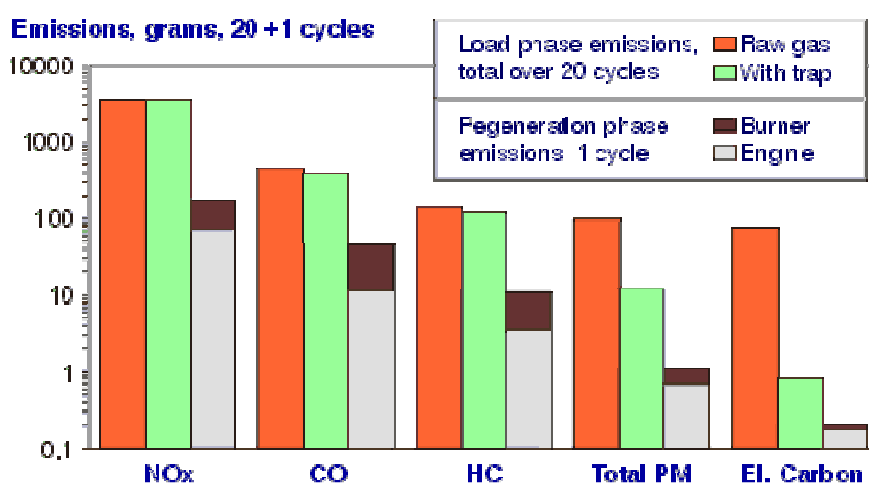


Figura 3.24: Performance di emissioni di un DPFS.

C'è un aumento del consumo di combustibile di circa 1-2% causato dalla presenza del bruciatore.

Filtri con rigenerazione elettrica

Con la tecnica della rigenerazione elettrica dei filtri di particolato, è necessario fornire un'adeguata energia per incrementare la temperatura tra il soot accumulato sul filtro e il flusso di gas. Questa energia può essere fornita al flusso dei gas di scarico, al substrato del filtro, direttamente al soot accumulato sul filtro, oppure a una combinazione di questi sistemi e per ogni tecnica utilizzata, la quantità di energia è diversa.

- *Riscaldamento del substrato* - questo metodo richiede che il substrato del filtro sia un conduttore di elettricità e il filtro potrebbe essere o di carta con metalli sinterizzati, oppure di silicio carbide. Se il materiale ha un'elevata capacità di riscaldarsi, il riscaldamento del substrato del filtro, ha un rendimento elevato e resta ancora oggi un prodotto in via di sviluppo.
- *Riscaldamento del soot* - l'energia necessaria alla combustione del soot può essere fornita direttamente al soot depositato attraverso l'uso di microonde.
- *Riscaldamento del gas di scarico /aria* - questa tecnica è molto comune per la rigenerazione del filtro specialmente per applicazioni off-road di veicoli industriali. La rigenerazione del filtro avviene riscaldando per mezzo di una resistenza i gas di scarico o un flusso d'aria ad una temperatura tale da bruciare il soot accumulato sul filtro.

L'uso di un riscaldatore elettrico per la combustione del soot, è una tecnica relativamente semplice e può essere applicata a diversi tipi di filtri. Nei sistemi che utilizzano filtri con flusso a parete, il riscaldatore viene posto a monte del filtro, esistono però soluzioni dove il riscaldatore è incorporato all'interno di esso.

In definitiva la rigenerazione può avvenire: a bordo, con sistemi di potenza esterni e a terra:

Nella rigenerazione a bordo, l'energia necessaria è fornita da un sistema elettrico con conseguenze sulla complessità dell'impianto elettrico e sui consumi del veicolo. Questi sono i motivi per cui questo tipo di rigenerazione la si trova applicata solo sui veicoli pesanti come camion e bus.

Si possono fare semplici calcoli per stimare il calore necessario per incrementare di 1°C la temperatura dei gas di scarico per 1 hp di potenza del motore. Assumendo di avere $m=5\text{kg/hp}$ di portata dei gas di scarico, di avere come calore specifico dei gas $C_p = 1,028 \text{ KJ/kg K}$ (aria @400°C), il calore richiesto è $Q = m C_p / 3,6 = 1,43 \text{ W/hp K}$.

Nei filtri elettrici con riscaldamento dell'intero flusso dei gas di scarico o di aria, c'è la necessità di riscaldare questo flusso fino a 550-700°C per ossidare il soot. Ipotizzando di dover riscaldare solo di 100°C il flusso di gas di scarico di un motore di 100hp, dovremmo spendere $100 \times 100 \times 1,43 = 14,3 \text{ kW}$ oppure 19,2hp. Sapendo che la conversione energia meccanica - energia elettrica è di circa 50%, dovremmo utilizzare circa 40hp di potenza del motore per la rigenerazione del filtro. Abbiamo detto che per la combustione del soot basta incrementare la temperatura dei gas

di scarico di circa 100°C, ma se si dovesse aumentare la temperatura di circa 250°C, sarebbe necessario impegnare quasi tutta la potenza del motore per la rigenerazione del filtro. Quindi è oneroso pensare di aumentare la temperatura di tutto il flusso del gas di scarico alla temperatura di combustione del soot. Però molta energia consumata, nel full-flow si perde quando si scaricano gas caldi su grandi quantità di aria provenienti dal tubo di aspirazione. Questo può essere ottimizzato utilizzando parte dei gas di scarico e aria calda rigenerata.

Nel partial-flow in cui solo una certa quantità dei gas di scarico viene riscaldata, la parte restante dei gas di scarico vengono bypassati, ma se c'è la necessità di filtrare il 100% dei gas di scarico, sarà necessario avere una coppia di filtri, in cui il flusso sarà deviato sul secondo filtro mentre sul primo sta avvenendo la combustione del soot caricato: figura 3.25.

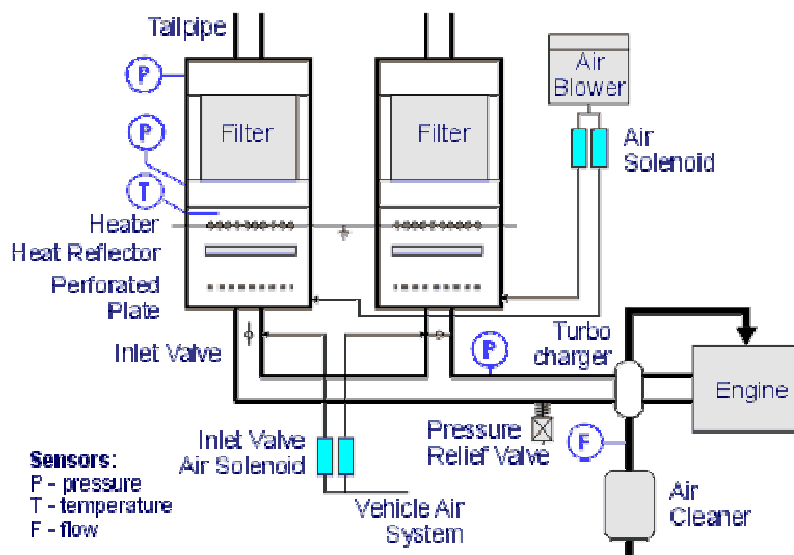


Figura 3.25: Schema del dispositivo della Donaldson a flusso parziale.

Questo di figura è lo schema del dispositivo della Donaldson elettronicamente controllato e totalmente automatico. Quando uno dei due filtri si satura di particolato l'ECU (non rappresentato in figura) inizia la rigenerazione inviando aria opportunamente riscaldata nel filtro da rigenerare e bypassando i gas di scarico sull'altro filtro attraverso una valvola. Il carico di particolato è determinato monitorando la misura della portata d'aria, la contropressione dei filtri e dalla temperatura interna del filtro.

Un dispositivo è stato testato su un Detroit Diesel engine che aveva accumulato 290.000Km in 8 anni. Il processo di rigenerazione durava circa 6,5 minuti, con una rigenerazione media ogni 4,2 ore, e un consumo di 150 A a 24 Volt. Durante la rigenerazione con un test Federal Heavy Duty Urban

Bus Cycle c'era un'efficienza di filtrazione del PM dell'85% e un'emissione secondaria di CO del 20%.

Nella rigenerazione con sistemi di potenza esterni, si collega tutto il sistema filtro ad un'unità che dà potenza al riscaldatore. Alcune volte per esempio, il riscaldatore fa parte del sistema on-board, invece il soffiatore potrebbe essere off-board e quindi c'è la necessità di dover collegare anche questo dispositivo al filtro per la rigenerazione. Anche se il filtro non deve essere rimosso dal condotto di scarico del motore, il mezzo comunque deve essere bloccato tutto il tempo necessario per la sua rigenerazione.

Per evitare problemi di contropressione e danneggiamenti al motore, il sistema è predisposto con un sensore di contropressione che allerta il guidatore, con l'accensione di una luce, che il filtro ha necessità di essere rigenerato nel più breve tempo possibile.

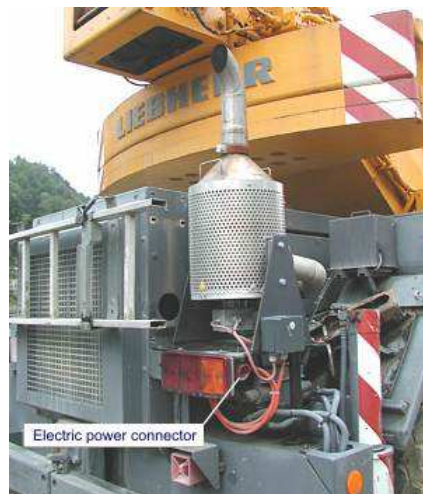


Figura 3.26: Sistema di potenza esterna per la rigenerazione del filtro.

Nella figura 3.27 invece, è schematizzato il layout del dispositivo STX della Engelhard per camion elevatori che si rigenera con un'unità esterna. Il filtro è costituito da 6 filtri separati di fibre ceramiche Nextel 312, ognuno avvolto su un elemento metallico riscaldante. Durante la rigenerazione, gli elementi riscaldanti forniscono calore all'aria di rigenerazione e agli strati adiacenti del filtro per l'ossidazione del soot depositato. Il soot brucia intorno ai 600°C, ma per garantire che sulla superficie esterna delle fibre ci sia questa temperatura, è necessario raggiungere una temperatura di 900°C tra le fibre e la parete riscaldante. Poiché questa temperatura è prossima a quella di fusione delle fibre, in ogni elemento filtrante è posta una termocoppia che controlla grazie all'ECU che la temperatura non raggiunga mai i 950°C. Quando il segnale di contropressione del filtro raggiunge un valore di soglia, l'ECU allerta l'operatore che il dispositivo ha bisogno di essere rigenerato. L'operatore porta il camion all'unità di rigenerazione RPU (Regeneration Power Unit) dove trova la potenza elettrica e l'aria necessaria per la rigenerazione. Il processo dura circa 14 minuti, l'intervallo delle rigenerazioni è di circa 6-8 ore e l'efficienza di filtrazione è circa 80-90%.

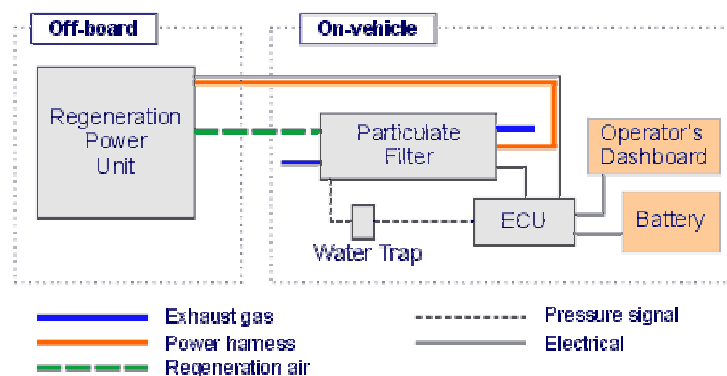


Figura 3.27: Layout del dispositivo STX della Engelhard.

Nei sistemi off-board, il filtro di particolato è rimosso dal veicolo e posto in un'unità esterna per la rigenerazione. Per risparmiare tempo, il filtro carico viene sostituito con un altro precedentemente rigenerato. Sia i sistemi di rigenerazione off-board che i sistemi di potenza esterni, richiedono questa periodica manutenzione che limita l'uso di questi dispositivi in quanto non è totalmente automatico, non è un sistema trasparente per il guidatore e non è perfettamente integrato con il veicolo. Nel particolare 3 della figura 3.28, viene rappresentato il sistema elettrico esterno per la rigenerazione del filtro particolare 1 della figura. Questo sistema comprende anche un dispositivo che facilita l'installazione e la disinstallazione del filtro dal tubo di scarico, particolare 2 di figura 3.28. Quando il filtro è carico di particolato, il sensore di contropressione fa lampeggiare una luce sul cruscotto del guidatore, che sta ad indicargli che il filtro ha bisogno di rigenerarsi.



Figura 3.28: Sistema off board per la rigenerazione del filtro.

La rigenerazione dei filtri off-road richiede comunque il lavoro di più persone specialmente per ciò che riguarda l'installazione e la disinstallazione del filtro.

La superficie del riscaldatore elettrico, in funzione della densità di energia [W/cm^2], quando viene attivata, raggiunge una temperatura elevata e questo significa calore trasmesso per convezione, perdite di calore, etc.

Le perdite di calore richiedono degli opportuni elementi coibentanti e le radiazioni di calore nella direzione opposta a quella del flusso dei gas, richiedono sistemi riflettenti (dischi di schiuma ceramica: particolare di figura 3.25) a monte del riscaldatore elettrico. Inoltre i sensori di temperatura permettono al controllo del sistema di avere dei feedback sulle temperature in gioco.

BIBLIOGRAFIA:

DieselNet Technology Guide

P. Richards: "Field Experience of DPF Systems Retrofitted to Vehicles with Low Duty Operating Cycles" SAE 2004-28-0013

4) SPERIMENTAZIONE IN SALA PROVA

4.1 INTRODUZIONE

Per verificare l'efficacia di alcuni dispositivi aftermarket per motori diesel heavy-duty, si è scelto un motore rappresentativo del parco circolante, le cui caratteristiche saranno descritte successivamente. Tali dispositivi sono stati provati secondo un protocollo di prova: "*Protocollo di Valutazione di Dispositivi per Motori Diesel Heavy-Duty*".

Nella tabella 2.2 del capitolo delle emissioni inquinanti, si nota che per questa classe di motori ci sono cicli di prova che cambiano in funzione dell'anno di omologazione e questo motore risponde alla direttiva Europea 91/542/CE. Gli strumenti di misura in sala prova hanno permesso di realizzare un ciclo 13 modi ESC secondo la direttiva 99/96/CE.

4.2 STRUMENTI PER PROVE AL BANCO

Al banco sono stati provati due diversi tipi di dispositivi: un filtro ceramico di cordierite catalizzato e un silenziatore catalitico in acciaio il cui flusso di gas di scarico passa attraverso una cartuccia catalizzante.

Di seguito una descrizione degli strumenti usati per la quantificazione degli inquinanti regolamentati CO, HC, NO_x e PM e del consumo specifico di combustibile.

FRENO DINAMOMETRICO

La prima apparecchiatura collegata al motore è il freno dinamometrico che serve a misurare la potenza del motore, ad assorbirla e a dissiparla. Il rotore è collegato al motore mediante un giunto elastico. Il freno è del tipo a correnti parassite e può assorbire potenze fino a 257 kW (350 cv). Ha una velocità massima di rotazione di 8.000 giri al minuto e può esercitare una coppia frenante massima di 1.400 Nm, il tutto con un'accuratezza dello 0.025 % del valore di f.s.

Il giunto che unisce il freno al motore è ovviamente in grado di sopportare i carichi massimi che tra i due si sviluppano. E' progettato per ruotare ad una velocità massima di 3.500 giri al minuto, assorbire una coppia massima di 1500 Nm e può essere accoppiato ad un motore di potenza massima pari a 300 kW.

ACCELERATORE

La regolazione del carico è effettuata da un attuatore costituito da un motore elettrico collegato ad un braccetto. Il braccetto è collegato mediante una barra e due snodi sferici, alla leva della pompa di iniezione su cui si agisce per regolare il motore.

L'attuatore è gestito da un modulo, indipendente da quello del freno, capace di variare la corsa dallo 0 al 100% con passo dello 0,1%. E' dotato di display numerico, di tasto di reset e di emergenza che permette un istantaneo ritorno alla posizione iniziale qualora ce ne fosse bisogno.

SISTEMA DI RAFFREDDAMENTO MOTORE

Il motore viene raffreddato mediante due scambiatori di calore acqua/acqua. Il liquido caldo proveniente dal motore entra nello scambiatore e cede calore, attraverso una parete divisoria, all'acqua fredda proveniente dalla rete idrica. L'acqua del motore una volta raffreddata viene reimpressa nel motore, mentre l'acqua riscaldata viene eliminata.

La temperatura del liquido di raffreddamento viene controllata da una valvola motorizzata che, in base alla temperatura letta da una termoresistenza, varia la portata d'acqua di raffreddamento agli scambiatori. Questo sistema di regolazione è in grado di mantenere la temperatura del liquido di raffreddamento e quindi del motore stesso, entro i limiti prescritti dal costruttore.

SISTEMA DI CONTROLLO TEMPERATURA GASOLIO

La temperatura del gasolio è tenuta sotto controllo mediante due piccoli scambiatori acqua/gasolio montati in serie. Uno serve per raffreddare, l'altro per riscaldare il gasolio. Entrambi sono dotati di elettrovalvola per l'apertura o la chiusura del flusso di liquido refrigerante o riscaldante. Come "refrigerante" viene usata acqua fredda presa dalla rete idrica come si fa anche per il raffreddamento del motore. Come "riscaldante" viene usato invece il fluido refrigerante che circola nel motore.

Il controllo della temperatura del Gasolio deve essere presente in quanto la normativa impone che la temperatura del gasolio sia mantenuta a 38°C di $\pm 5^{\circ}\text{C}$.

Il sistema di controllo, automaticamente, gestisce le due elettrovalvole in base alla temperatura del gasolio misurata da una termocoppia posta all'ingresso del motore. Se la temperatura del gasolio è troppo elevata la valvola che fa circolare il refrigerante si apre mentre quella del "riscaldante" resta chiusa. Il contrario avviene se la temperatura è troppo bassa.

MISURATORE PORTATA DI COMBUSTIBILE

La portata massica di combustibile viene misurata da una bilancia elettronica. La bilancia ha al suo interno una pignatta, di acciaio che periodicamente viene riempita di combustibile e durante il funzionamento del motore, l'unità di controllo registra la diminuzione di peso della pignatta in modo continuo e fornisce il consumo di combustibile del motore.

La bilancia invia il valore del peso istante per istante al modulo di controllo che lo visualizza e che provvede al rabbocco della pignatta quando questa raggiunge un valore minimo in peso. Durante l'operazione di riempimento della pignatta, il calcolo del consumo del motore si interrompe.

La pignatta ha una capacità massima di 1 kg mentre la bilancia ha un range di misura che va da 0 a 120 kg/h con una accuratezza pari a $\pm 0,15\%$ del valore misurato.

MISURATORE PORTATA D'ARIA

La portata d'aria aspirata dal motore viene misurata da una ventola tarata che fornisce un segnale elettrico ad un opportuno modulo che restituisce il valore della portata in m^3/h o in kg/h .

L'aria di aspirazione dopo essere stata filtrata, con lo stesso filtro montato sul veicolo, viene inviata ad un condotto d'acciaio lungo circa tre metri. All'interno di questo condotto è presente una ventola che, investita dal flusso turbolento d'aria, viene messa in rotazione. La ventola segue in maniera molto precisa le variazioni di velocità della colonna d'aria che la investe. Viene mantenuta al centro del condotto in asse con esso da un'asticella alla cui estremità è posto un sensore alimentato che si accorge del passaggio delle pale della ventola.

Il sistema ha un range di misura che va da 30 a $1000 \text{ m}^3/\text{h}$ con un errore dell'ordine di $\pm 0,2\%$ del valore misurato. Quando si è installato questo sistema si è anche verificato, come previsto dalla normativa, che la depressione all'aspirazione costituita da filtro aria, condotto e ventola, coincidesse entro $\pm 100 \text{ Pa}$ con il limite superiore del motore funzionante al regime di potenza massima dichiarata e a pieno carico.

ANALIZZATORE PARTICOLATO

L'apparecchiatura per la misura del particolato è un minitunnel MIC4 della NOVA MMB. L'apparecchiatura usata è del tipo a flusso parziale con misurazione di portata d'aria e di combustibile e a campionamento totale.

Il funzionamento dello strumento prevede che il campione del gas di scarico venga prelevato e mantenuto ad elevata temperatura e inviato ad un tunnel di diluizione dove si miscela perfettamente con una opportuna quantità di aria filtrata, e condizionata. La miscela di aria e gas di scarico viene poi inviata in due condotti alternativamente. Durante le fasi di misurazione passa nel condotto di misura e deposita il particolato sui due filtri di misura (primario e di sicurezza). Durante le fasi in cui non avviene la misura viene inviata ad un secondo condotto detto di by-pass nel quale, come in quello di misura, si raccoglie il particolato su un'altra coppia di filtri.

Il minitunnel è governato da un computer che procede anche all'acquisizione e memorizzazione di svariati parametri utili sia al minitunnel che ai calcoli previsti per la determinazione dei g/kWh di PM emessi durante una prova.

L'analizzatore ha un margine di errore nella misura e nel controllo delle portate minore dell'1% mentre è minore dello 0,1% nella misura e nel controllo delle temperature. La massima portata di fluido che può attraversare i filtri è di 100 litri al minuto.

ANALIZZATORE CO

L'ossido di carbonio viene misurato da un analizzatore a infrarosso della ABB Uras 14. L'analizzatore ha due range di misura da 0 a 20000 ppm e da 0 a 5000 ppm e l'errore sulla misura è $\leq 0,5\%$ del f.s.

ANALIZZATORE CO₂

La CO₂, anche se la normativa non prevede un suo controllo, è stata misurata ed acquisita da un Uras 14 dell'ABB. Il principio di funzionamento di tale analizzatore è identico a quello usato per la misura dell'ossido di carbonio.

Ha due range di misura: 0 – 10% e 0 - 20% e l'errore che può commettere nella misura è di $\pm 0,5\%$ del f.s.

ANALIZZATORE HC

Gli HC sono analizzati da uno strumento a ionizzazione di fiamma della Rosemount/Beckman: Model 404 Hydrocarbon Analyzer. Questo strumento è di tipo caldo con sonde, filtro e pompa calda.

L'analizzatore ha vari range di funzionamento: 10, 25, 100, 250 ppm e 0.1, 0.25, 1 % e per tutti i range l'errore massimo è di $\pm 1\%$ del f.s.

ANALIZZATORE NO_x

Gli NO_x vengono misurati da un analizzatore a chemiluminescenza della Rosemount/Beckman: Model 951A NO/NO_x Analyzer.

L'analizzatore ha vari range di funzionamento e per tutti i range l'errore massimo è di $\pm 0,5\%$ del f.s.

SONDA DI CAMPIONAMENTO DEI GAS

La sonda di prelievo dei gas di scarico è mantenuta in un range di temperatura di $190 \pm 10^\circ\text{C}$ per evitare eventuali depositi di idrocarburi sulla parete della sonda. I gas mantenuti a temperatura vengono filtrati e mandati per mezzo di una pompa all'analizzatore degli HC e attraverso un'altra sonda agli analizzatori di CO, CO₂ e NO_x facendoli passare prima in un frigorifero per permettergli di lasciare la condensa contenuta nei gas all'interno di un vaso di espansione.

CONDOTTO DI SCARICO

Il condotto di scarico usato in laboratorio è tale da permettere: un corretto smaltimento dei gas di scarico, adeguate temperature e adeguate posizioni delle sonde di prelievo dei gas e del particolato. Ha un diametro sufficiente a mantenere una contropressione allo scarico che si mantenga in un

range di ± 1000 Pa rispetto alle indicazioni del costruttore, quando il motore funziona in piena potenza.

SENSORI TEMPERATURA

Sono misurate e tenute sotto controllo varie temperature mediante termocoppie di tipo J (range 0 - 700 °C), K (range 0 – 1.200 °C) e termoresistenze PT100 (range -220 +850 °C).

Le temperature misurate sono:

- Temperatura olio motore;
- Temperatura acqua motore;
- Temperatura acqua all'ingresso ed uscita dello scambiatore;
- Temperatura gasolio;
- Temperatura sala prova;
- Temperatura aria aspirazione uscita intercooler;
- Temperatura aria aspirazione dopo filtro aria;
- Temperatura gas di scarico;
- Temperatura a monte e valle dei catalizzatori.

L'umidità della sala prova viene calcolata con una coppia di termometri in grado di misurare la temperatura di bulbo asciutto e quella di bulbo bagnato.

MISURA CONTROPRESSIONI - DEPRESSIONI

Viene anche misurata la contropressione allo scarico, la depressione all'aspirazione, e la pressione dell'aria di aspirazione a valle del compressore. La contropressione allo scarico è misurata con un manometro ad U a mercurio, la depressione all'aspirazione viene misurata con un manometro ad U ad acqua e la pressione di sovralimentazione mediante un manometro.

Viene anche misurata la pressione dell'olio motore mediante un manometro, al fine di controllare il corretto funzionamento del motore.

Durante le prove effettuate con i catalizzatori sono state misurate anche le pressioni a monte e valle dei dispositivi usando due manometri ad U ad acqua.

SISTEMA DI ACQUISIZIONE

Gli strumenti in grado di dare in uscita un segnale analogico 0-10 Volt e le temperature vengono acquisiti per mezzo di una scheda di acquisizione della National Instrument Model Analog Devices e campionati ogni secondo per mezzo di un PC ad essa collegata.

4.3 DESCRIZIONE MOTORE AL BANCO

Di seguito una descrizione del motore su cui sono state fatte le prove in sala:

Il motore al banco freno è un FIAT IVECO 8360 installato ancora su un gran numero di autobus dell'ANM (Azienda Napoletana Mobilità) e CTP (Consorzio Provinciale Trasporti) in circolazione a Napoli e Provincia. Rispetta la normativa EURO 2 ed ha le caratteristiche descritte nella tabella 4.1.

Costruttore	Fiat Iveco
Tipo Motore	8360.46B.4648
Ciclo	Diesel 4 tempi
Combustibile	Gasolio
Numero Cilindri	6 in linea
Alesaggio	112 mm
Corsa	130 mm
Cilindrata totale	7685 cc ³
Rapporto di compressione : ρ	17.6 \pm 0.8
Potenza massima	162 kW (220 cv)
Regime di potenza massima	2050 giri/minuto
Coppia massima	950 Nm (96.8 kgm)
Regime di coppia massima	1200 giri/minuto
Regime minimo del motore	625 \pm 25
Regime massimo del motore	2300 \pm 25
Anticipo apertura valvola asp. prima del P.M.S.	17°32'
Ritardo chiusura valvola asp. dopo il P.M.I.	38°44'
Anticipo apertura valvola sca. prima del P.M.I.	53°08'
Ritardo chiusura valvola sca. dopo il P.M.S.	13°37'
Alimentazione	Pompa iniez. Bosch
Pressione di iniezione	240 \pm 12 bar
Tipo di iniezione	Diretta
Sovralimentazione	Turbocompressore tipo KKK

Tabella 4.1 Descrizione del motore al banco prova.

4.4 CURVA DI POTENZA

Installato il motore e verificato il corretto funzionamento, si è tracciata la curva di potenza.

Dopo aver portato tutti i fluidi del motore intorno alla temperatura di circa 80°C, abbiamo posto l'attuatore del carico al 100%. Abbiamo poi "sfrenato" lentamente il motore, diminuendo piano piano il carico e facendo aumentare i giri del motore ad intervalli di 100 giri/minuto fino a fargli raggiungere il suo regime massimo di rotazione. Da qui si è iniziato la fase di discesa, cioè dal regime massimo al regime minimo di rotazione passando per gli stessi numeri di giri della fase di salita del motore.

Facendo una media dei valori e correggendo la potenza letta ad ogni regime tenendo conto della temperatura della sala e della pressione del giorno, si è tracciata la curva di potenza i cui valori sono rappresentati in tabella 4.2.

Giri al minuto	Potenza (kW)	Coppia (Nm)
800	72,7	748,5
900	80,2	809,3
1000	93,7	898,6
1100	107,0	931,0
1200	118,9	943,7
1300	128,3	937,3
1400	135,0	919,7
1500	143,1	907,9
1600	148,2	881,9
1700	152,2	853,5
1800	155,8	827,0
1900	160,0	802,0
2000	162,4	776,0
2050	162,6	758,3
2100	162,7	739,2
2200	63,4	277,6

Tabella 4.2: Valori medi di coppia e potenza ottenuti dal motore al banco

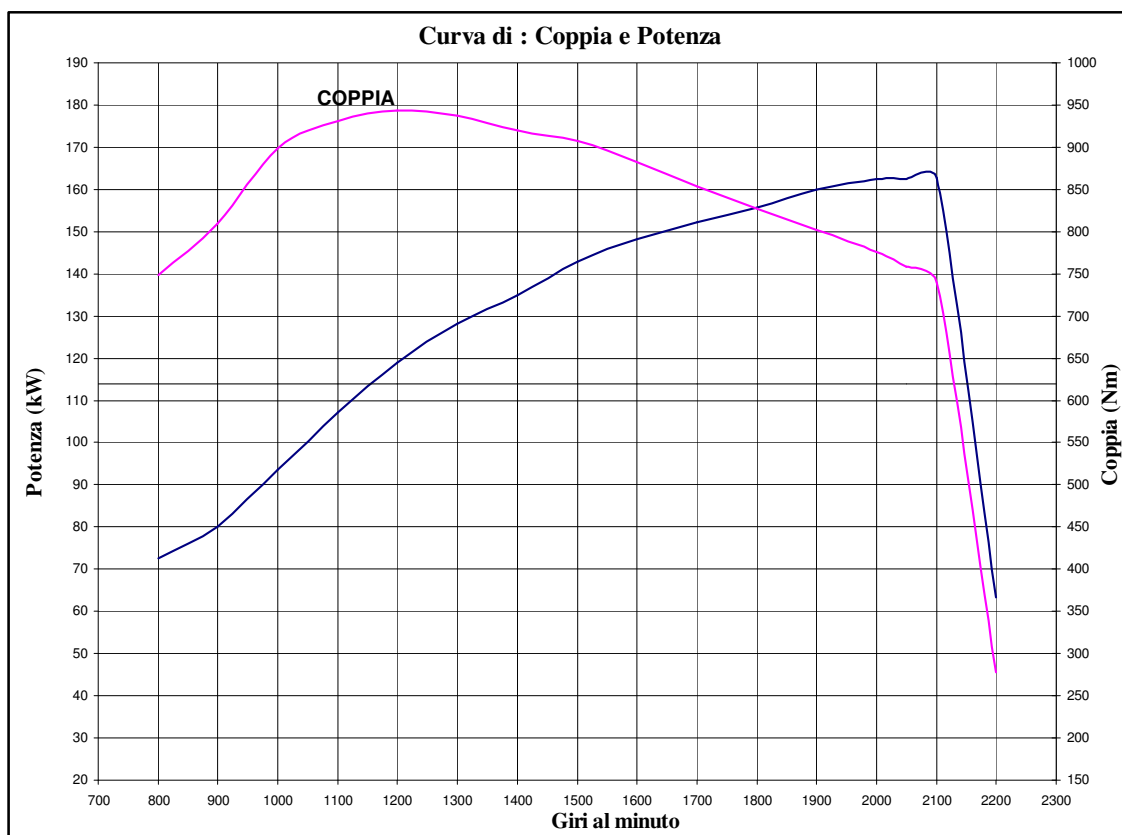


Figura 4.1: Diagramma di coppia e potenza.

4.5 ESECUZIONE PROVE

Dopo aver tracciato la curva di potenza sono stati individuati i regimi di rotazione A, B, e C come prescritto dalla normativa ottenendo i seguenti valori :

- $P(\max) = 162.7 \text{ kW}$.
- $70\% P(\max) = 113.9 \text{ kW}$.
- $50\% P(\max) = 81.3 \text{ kW}$.
- $n_{lo} = 900$ giri al minuto.
- $n_{hi} = 2150$ giri al minuto.
- $A = 1212$ giri al minuto.
- $B = 1525$ giri al minuto.
- $C = 1837$ giri al minuto.

Individuati i tre regimi sono poi stati calcolati i valori del carico corrispondenti alle percentuali presenti nel 13 modi ESC.

Usando i fattori di ponderazione e moltiplicandoli per 4 abbiamo ottenuto i tempi minimi di misurazione del particolato. Tali valori come previsto dalla normativa, sono stati raddoppiati allo scopo di accumulare una maggiore quantità di particolato sui filtri.

Abbiamo così ottenuto le 13 modalità per ogni prova come indicato in tabella 4.3.

Modalità numero	Regime motore $[\text{min}^{-1}]$	Carico [kW]	Fattore di ponderazione	Durata della modalità	Tempo minimo campionamento PT	Tempo campionamento PT usato
1	700	0	0.15	4 minuti	60	120
2	1212	120	0.08	2 minuti	32	64
3	1525	73	0.10	2 minuti	40	80
4	1525	109	0.10	2 minuti	40	80
5	1212	60	0.05	2 minuti	20	40
6	1212	90	0.05	2 minuti	20	40
7	1212	30	0.05	2 minuti	20	40
8	1525	145	0.09	2 minuti	36	72
9	1525	36	0.10	2 minuti	40	80
10	1837	158	0.08	2 minuti	32	64
11	1837	40	0.05	2 minuti	20	40
12	1837	119	0.05	2 minuti	20	40
13	1837	79	0.05	2 minuti	20	40

Tabella 4.3: Modalità di funzionamento del 13 modi ESC

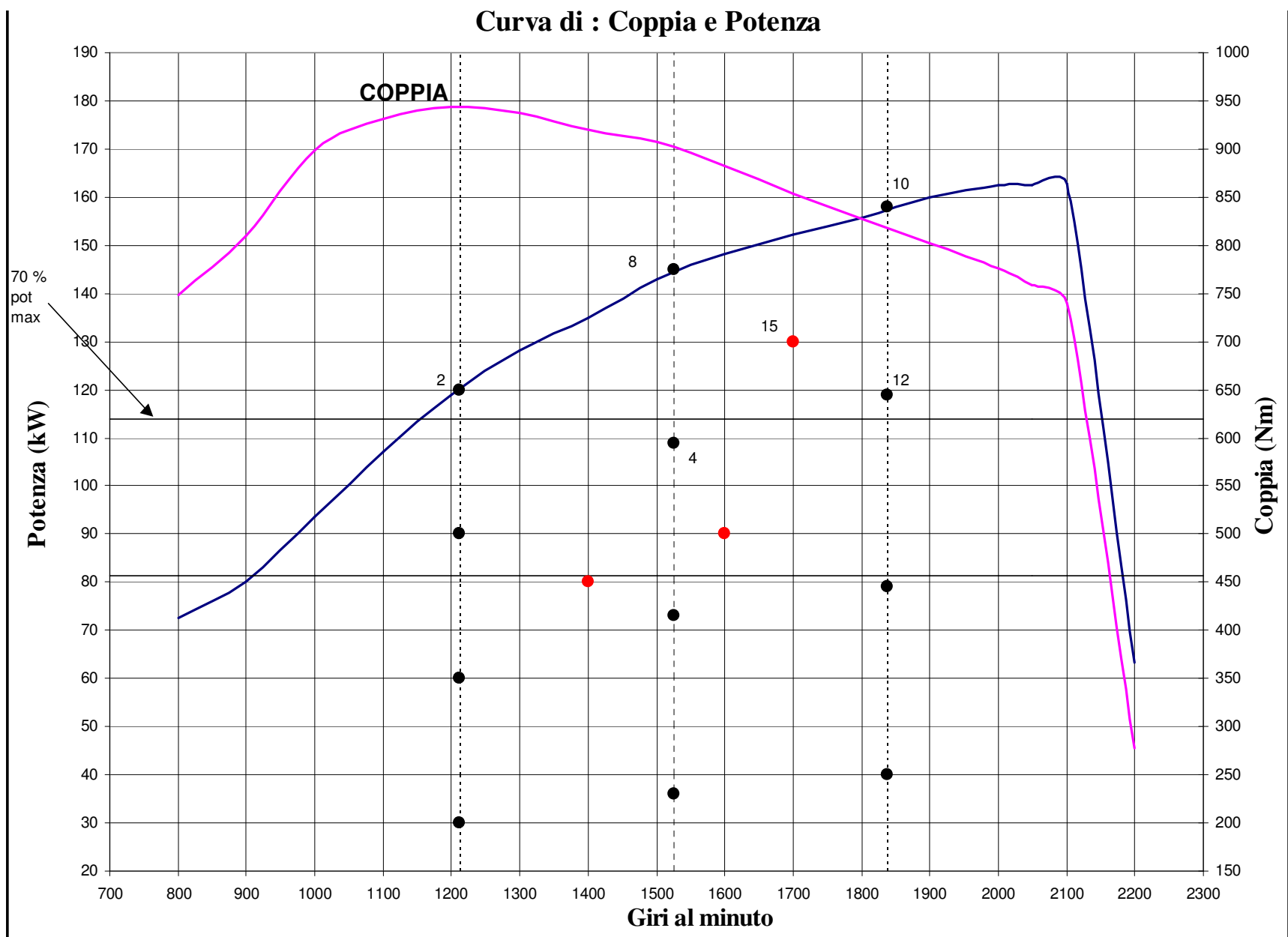


Figura 4.2: Diagramma dei punti di funzionamento del 13 modi ESC

Individuate le 13 modalità di funzionamento, sono stati scelti i tre punti aggiuntivi per la verifica degli ossidi di azoto all'interno dell'area di controllo.

I valori corrispondenti sono illustrati nella seguente tabella 4.4:

Modalità numero	Regime motore	Carico [kW]	Durata della modalità
14	1400	80	2 minuti
15	1700	130	2 minuti
16	1600	90	2 minuti

Tabella 4.4: Modalità di funzionamento dei punti di controllo degli NOx.

E' stato poi realizzato un foglio di calcolo nel quale vengono elaborati tutte le grandezze acquisite e registrate necessarie all'ottenimento dei valori in g/kWh degli inquinanti regolamentati. Nelle pagine successive viene rappresentato un tipico foglio di calcolo di una prova.

Consiglio Nazionale delle Ricerche Istituto motori AREA AMBIENTE E NORMATIVA - sala prova C2 Motore IVECO 8360 46B (7685 cm3 n. 6 cilindri) turbo intercooler combustibile: gasolio commerciale								PROGETTO: Sviluppo di un protocollo di valutazione di dispositivi heavy-duty															
								data della prova:10-10-2002mat configurazione A prova n. 2 senza catalizzatore															
Modo	Regime di rotazione motore	Carico percentuale	Coppia	Potenza	Carico imposto / Potenza imposta	Pressione atmosferica totale sala prova		Pressione Atmosferica riferita al secco	Temperatura aria ambiente subito dopo filtro aria		Parametro delle condizioni di prova	Temperatura bulbo bagnato	Temperatura bulbo asciutto	Tensione di vapore saturo alla Tbb	Costante di Farrel	Pressione di vapore nell'aria di aspirazione	Tensione di vapore saturo alla Tba	Umidità relativa aria aspirata	Tensione di vapore saturo (alla temperatura di aspirazione)	Umidità assoluta aria di aspirazione			
	Imposto	imposto	letto	letto	imposta	letto	calcolata	calcolata	letto	calcolato	calcolato	letto	letto	calcolato	calcolata	calcolato	calcolato	calcolato	calcolato	calcolato			
	rpm	%	Nm	kw	kw	mm Hg	kPa	kPa	°C	°K		°C	°C	kPa		kPa	kPa	%	kPa	g/kg			
	giri/min	% cop				Patm		Ps	Ta		F	Tbb	Tba	PW	A	PV	PWTD	Ra	Pa	Ha			
1	700	0	0	0	0	754,15	100,54	98,131	21,6	294,76	0,98982	21,4	23	2,540636	0,00038	2,4136	2,8005	86,183	2,5829	14,0828			
2	1212	100	964	123	120	754,15	100,54	98,131	21,2	294,36	0,98781	21,4	23	2,540636	0,00038	2,4136	2,8005	86,183	2,5264	13,7679			
3	1525	50	456	72,7	73	754,15	100,54	98,131	21,8	294,96	0,99083	21,4	23	2,540636	0,00038	2,4136	2,8005	86,183	2,6119	14,2445			
4	1525	75	700	112	109	754,15	100,54	98,131	21,8	294,96	0,99083	21,4	23	2,540636	0,00038	2,4136	2,8005	86,183	2,6119	14,2445			
5	1212	50	475	60	60	754,15	100,54	98,131	21,8	294,96	0,99083	21,4	23	2,540636	0,00038	2,4136	2,8005	86,183	2,6119	14,2445			
6	1212	75	715	90,9	90	754,15	100,54	98,131	21,6	294,76	0,98982	21,4	23	2,540636	0,00038	2,4136	2,8005	86,183	2,5829	14,0828			
7	1212	25	237	30,2	30	754,15	100,54	98,131	21,6	294,76	0,98982	21,4	23	2,540636	0,00038	2,4136	2,8005	86,183	2,5829	14,0828			
8	1525	100	903	144	145	754,15	100,54	97,864	21,8	294,96	0,99273	23	24,5	2,800535	0,00038	2,68122	3,065	87,479	2,6119	14,4636			
9	1525	25	234	37	36	754,15	100,54	97,864	22	295,16	0,99374	23	24,5	2,800535	0,00038	2,68122	3,065	87,479	2,6414	14,6306			
10	1837	100	820	158	158	754,15	100,54	97,864	22,7	295,86	0,99727	23	24,5	2,800535	0,00038	2,68122	3,065	87,479	2,7484	15,238			
11	1837	25	203	39	40	754,15	100,54	97,864	22	295,16	0,99374	23	24,5	2,800535	0,00038	2,68122	3,065	87,479	2,6414	14,6306			
12	1837	75	608	117	119	754,15	100,54	97,864	21,3	294,46	0,9902	23	24,5	2,800535	0,00038	2,68122	3,065	87,479	2,5404	14,0584			
13	1837	50	410	78,5	79	754,15	100,54	97,864	22,5	295,66	0,99626	23	24,5	2,800535	0,00038	2,68122	3,065	87,479	2,7172	15,0609			
14	1400		547	80	80	754,15	100,54	97,978	22,9	296,06	0,99747	22,7	25	2,750105	0,00038	2,56722	3,1579	81,296	2,7801	14,3032			
15	1700		724	129	130	754,15	100,54	97,978	22,9	296,06	0,99747	22,7	25	2,750105	0,00038	2,56722	3,1579	81,296	2,7801	14,3032			
16	1600		530	89,6	90	754,15	100,54	97,978	23,1	296,26	0,99848	22,7	25	2,750105	0,00038	2,56722	3,1579	81,296	2,8123	14,4726			
Z	Nz	Mz	Nrt	Nsu	Mr	Ms	Mt	Mu	Mtu	Mrs													
14	1400	547	1212	1525	475	456	715	700	706	463,588													
15	1700	724	1525	1837	700	608	903	820	856,4	648,397													
16	1600	530	1525	1837	456	410	700	608	677,9	444,942													
Er	Es	Et	Eu	Etu	Ers	Ez	NOx z	NOx diff															
13,946	12,375	11,45	11,22	11,32	13	12,4216	11,561	-6,9283															
11,225	10,582	10,15	9,583	9,83	10,86	10,4886	10,647	1,5098															
12,375	10,325	11,22	10,58	11,07	11,88	11,5857	11,718	1,1432															

Fattore di correzione per il calcolo di Kw	Portata massica fuel	Portata massica aria aspirata su secco	Portata massica aria aspirata su umido	Fattore di correzione	Fattore di correzione secco - umido	Concentrazione NOx su secco	Concentrazione CO su secco	Concentrazione CO su umido	Concentrazione HC	Concentrazione NOx su umido	Fattore di correzione dei NOx	Titolo aria ambiente /aspirazione	Portata massica vapore d'acqua aria aspirata	Portata massica gas scaricato su umido	Portata massica NOx	Portata massica CO	Portata massica HC	Fattore di ponderazione	Portata massica NOx per WF	Portata massica CO per WF	Portata massica HC per WF	Potenza per WF	Emissione specifica NOx	Emissione specifica CO	Emissione specifica HC
calcolato	acquisito	calcolato	acquisito	calcolato	calcolato	acquisito	acquisito	calcolato	acquisito	calcolato	calcolato	calcolato	calcolato	calcolato	calcolato	calcolato	calcolato	imposto	calcolato	calcolato	calcolato	calcolato			
	kg/h	kg/h	kg/h			ppm	ppm	ppm	ppm	ppm			kg/h	kg/h	g/h	g/h	g/h		g/h	g/h	g/h	kW	g/kWh	g/kWh	g/kWh
Kw2	Gfuel	Gaird	Gairw	Ffh	Kw	NOx concd	CO concd	CO concw	HC w	NOx concw	Khd	x	M H2O	Gexhw	NOx mass	CO mass	HC mass	WF	NOx*WF	CO*WF	HC*WF	Pn * WF	<u>NOx</u>	<u>CO</u>	<u>HC</u>
0,02214	1,372	189,55	192,45	1,95506	0,96371	248,453	430,3	414,6824	185,225	239,436	1,121304	0,0153	2,899889	193,8261	82,585107	77,6435	17,19679	0,15	12,38777	11,64652	2,57952	0	10,996	2,0295	0,4251
0,02166	25,57	509,92	517,72	1,87633	0,88425	1116,89	2713	2398,974	106,95	987,614	1,031496	0,0153	7,801043	543,2946	878,34966	1259,04	27,83246	0,08	70,26797	100,7229	2,2266	9,84			
0,02239	15,045	505,05	512,78	1,91288	0,92063	1083,12	117,3	107,9893	105,2	997,151	1,077073	0,0153	7,72648	527,8206	899,6412	55,061	26,5973	0,1	89,96412	5,506104	2,65973	7,27			
0,02239	22,027	590,32	599,35	1,8992	0,90674	1323,66	80,8	73,26474	122,4	1200,22	1,062202	0,0153	9,031014	621,3795	1257,1898	43,9773	36,43123	0,1	125,719	4,397735	3,64312	11,2			
0,02239	12,427	378,56	384,36	1,90733	0,91499	1355,94	75,65	69,21934	123,65	1240,68	1,071018	0,0153	5,791457	396,7834	836,73124	26,5313	23,50083	0,05	41,83656	1,326564	1,17504	3			
0,02214	18,312	431,52	438,13	1,89	0,89765	1524,48	416,3	373,6923	132,95	1368,45	1,050049	0,0153	6,601661	456,4383	1040,8756	164,768	29,06738	0,05	52,04378	8,23841	1,45337	4,545			
0,02214	7,0327	339,52	344,71	1,92963	0,93789	949,79	140,5	131,7731	173,35	890,795	1,092911	0,0153	5,194126	351,7462	543,46169	44,7748	29,20712	0,05	27,17308	2,238738	1,46036	1,51			
0,02273	28,345	670,26	681,68	1,8904	0,89733	1368,49	165,5	148,5078	138,175	1227,98	1,055887	0,01704	11,42203	710,0238	1461,0296	101,859	46,99351	0,09	131,4927	9,167309	4,22942	12,96			
0,02299	8,93	435,3	442,72	1,93007	0,93742	817,653	124,2	116,3995	153,425	766,485	1,104184	0,01704	7,418137	451,6525	606,63342	50,7847	33,1922	0,1	60,66334	5,078468	3,31922	3,7			
0,02392	31,51	860,83	875,5	1,9006	0,90651	1075,31	61,8	56,02249	128,325	974,779	1,079066	0,01704	14,66958	907,0066	1514,0557	49,0851	55,75159	0,08	121,1245	3,926811	4,46013	12,64			
0,02299	10,197	533,92	543,02	1,93271	0,9401	588,557	131,7	123,8116	146,475	553,304	1,107308	0,01704	9,098758	553,2209	537,90763	66,1663	38,81482	0,05	26,89538	3,308315	1,94074	1,95			
0,02211	24,469	744,9	757,59	1,90739	0,91524	1019,61	47,2	43,19924	113,65	933,189	1,069002	0,01704	12,69398	782,0595	1238,1256	32,6357	42,57403	0,05	61,90628	1,631785	2,1287	5,85			
0,02365	16,979	625,17	635,83	1,91779	0,92427	771,75	65,2	60,26239	130,8	713,305	1,096805	0,01704	10,65375	652,8063	810,52462	38,0021	40,9004	0,05	40,52623	1,900106	2,04502	3,925			
0,02248	16,9	475,25	483	1,90243	0,90987	1204,17				1095,63	1,064042	0,0163	7,745556	499,9	924,87546				862,0006	159,0897	33,321	78,39			
0,02248	26,5	732,07	744	1,90128	0,90869	1162,88				1056,7	1,062946	0,0163	11,93104	770,5	1373,4512										
0,02274	19,2	580,54	590	1,90694	0,91419	1109,29				1014,1	1,0709	0,0163	9,461445	609,2	1049,9434										

pagina n.3 del foglio prova configurazione A prova n. 2

Portata diluita equivalente	Massa aria di diluizione	Portata diluita equivalente per WF	Massa totale particolato raccolto sui filtri	Portata massica di particolato	Emissione specifica a particolato	fattore di ponderazione efficace	fattore di ponderazione	differenza dei fattori di ponderaz.	Concentrazione CO2 su secco	Concentrazione CO2 su umido	portata massica di CO2	Portata massica CO per WF	Emissione specifica CO2	Consumo	Consumo *WF	Consumo specifico
Imposto	Dal MIC 4	calcolata	misurato	calcolato		calc.	imposto	calcolato	acquisito	calcolato	calcolato	calcolato	calcolato	calcolato	calcolato	
kg/h	kg	kg/h	mg	g/h	g/kWh						g/h	g/h	g/kWh	g/h	g/h	g/kWh
Gedfw	M SAM	Gedf*WF	Mf	PTmas	PT	WFei	WFi		CO2 concd	CO2 concw	CO2 mass	CO2*WF	CO2	GFUEL	GFUEL*WF	GFUEL
4929,7	0,2	739,455	2,486	9,2862	0,1185	0,1515	0,15	-0,00155	0,014	0,01349	3996	599,45	707,2534	1372	205,8025	209,1378046
4990,3	0,107	399,224				0,0801	0,08	-9,3E-05	0,11	0,09727	80758	6460,6		25570	2045,628	
5011,9	0,133	501,19				0,0991	0,1	0,000874	0,0713	0,06564	52947	5294,7		15045	1504,486	
5004,4	0,133	500,44				0,0993	0,1	0,000726	0,0885	0,08025	76202	7620,2		22027	2202,7	
5012,6	0,067	250,63				0,0499	0,05	7,14E-05	0,079	0,07228	43831	2191,5		12427	621,37	
4998	0,067	249,9				0,0501	0,05	-7,4E-05	0,1	0,08977	62614	3130,7		18312	915,615	
5002,5	0,067	250,125				0,05	0,05	-2,9E-05	0,049	0,04596	24703	1235,2		7032,7	351,6338	
4999,5	0,12	449,955				0,0897	0,09	0,000341	0,0982	0,08812	95613	8605,1		28345	2551,008	
4977,7	0,133	497,77				0,0998	0,1	0,000193	0,048	0,045	31057	3105,7		8930	892,995	
4987,5	0,107	399				0,0801	0,08	-0,00014	0,0842	0,07633	1E+05	8463,8		31510	2520,818	
5007,3	0,067	250,365				0,05	0,05	1,86E-05	0,0443	0,04165	35209	1760,5		10197	509,8575	
4994,2	0,067	249,71				0,0501	0,05	-0,00011	0,075	0,06864	82038	4101,9		24469	1223,449	
4980	0,067	249				0,0503	0,05	-0,00026	0,0623	0,05758	57445	2872,2		16979	848,9513	
64896	1,335	4986,764									55442			222216	16394,31	

Uno dei dispositivi provati al banco è il DPX della Engelhard che ha lo scopo di realizzare un sostanziale abbattimento del particolato (PM) emesso dai motori diesel heavy duty.

Si passa ora a descrivere le caratteristiche del dispositivo dai dati forniti dalla casa costruttrice:

Il cuore del dispositivo è un filtro ceramico (Cordierite) impregnato con metalli nobili in modo non uniforme: Zone Coating (zone con 357 g/m^3 di Platino e zone con $1,78 \text{ kg/m}^3$), questo rende il dispositivo capace di abbattere sostanzialmente anche le emissioni di CO e HC, mentre non ha alcun effetto rilevante sugli NO_x . Il nido d'ape si differenzia da quello delle comuni "marmitte catalitiche" in quanto le celle risultano appositamente "ostruite" in modo che il gas di scarico in ingresso ad ogni singola cella non riesce a fuoriuscire dalla corrispondente cella di uscita ma a passare attraverso le pareti del condotto e di liberare il gas del suo contenuto di particolato (la numerosità delle celle è di 100 cpsi). In tal modo, purchè la temperatura media di esercizio del gas all'interno della trappola sia congrua, il particolato viene ossidato almeno fino all'80%. Inoltre il CO e gli HC subiscono ossidazione catalitica e vengono convertiti almeno dell'80-90%. Il principio è una redox fra l' NO_2 e il particolato; l' NO_2 è prodotto utilizzando gli NO del gas di scarico e O_2 intrappolato dai metalli base di cui - insieme al metallo prezioso - è costituita l'impregnazione del pezzo. L' NO_2 si riduce ad NO, mentre ossida il particolato ed il ciclo ricomincia. Tale tecnologia lo rende adatto ai motori aspirati oltre che ai turbo e non necessita di alcun tipo di additivo da aggiungere al combustibile. Affinchè il processo si compia nella maniera prevista è necessario che la temperatura media del gas di scarico sia 250°C . Se fosse compresa fra 200 e 250°C occorrono 6-10 picchi/ora di 350°C . Temperature medie inferiori ai 200°C sono accettabili purchè i picchi siano di almeno 400°C . Non esiste un dispositivo valido per tutti i veicoli, ma esso deve essere costruito in termini di carica e di volume, caso per caso. Il ricoprimento con metalli a zone, consente di ottimizzare i risultati a parità di metallo nobile utilizzato e si pensa che contribuisca a diminuire la formazione di Solfati. Il monolita ceramico può essere a sezione rotonda od ovale, eventualmente preceduto da un pre-catalizzatore a metalli base in caso di presenza allo scarico di oli lubrificanti (motori molto vecchi) che costituisce la "frazione organica solubile", strippabile dal particolato tramite il pre-cat. Il dispositivo è compatibile con combustibili con tenore di zolfo fino a 350 ppm. L'unica attenzione è la pulizia del pezzo tramite aspirazione con aria calda due o tre volte all'anno anziché una sola volta (in caso di tenori di Zolfo di 50 ppm) in quanto l'alto quantitativo di zolfo, produce ceneri (solfati) che farebbero aumentare la contropressione allo scarico e andrebbero a ricoprire parte dei siti attivi del metallo nobile.

La contropressione rimane nei limiti generalmente accettati di 5-6 KPa e tende ad incrementare nel tempo a causa della formazione di ceneri che devono essere eliminate pulendo i pezzi una o due volte all'anno. Bisogna fare attenzione a non posporre la pulizia oltre il dovuto in quanto si

potrebbero ingenerare eccessive temperature che porterebbero alla formazione di cricche nel monolita ceramico o alla sinterizzazione di alcune regioni del pezzo. Il segnale di pericolo è dato da un ciclo di contropressione che inizia con un rapido e deciso incremento, seguito da una brusca caduta della contropressione stessa e da un aumento della fumosità allo scarico.

4.6 DESCRIZIONE DEL PROTOCOLLO DI PROVA

Per testare la trappola catalizzata, è stato utilizzato il seguente protocollo sperimentale.

Poichè il dispositivo da provare non richiedeva alcuna modifica al motore, si è proceduto a realizzare questa procedura di prove:

CONFIGURAZIONE STANDARD A: configurazione standard del motore (tre prove di apertura);

CONFIGURAZIONE B: configurazione con dispositivo installato sul motore come indicato dall'azienda;

CONFIGURAZIONE STANDARD A: configurazione standard del motore (tre prove di chiusura).

La procedura eseguita ha previsto:

1. lavaggio del sistema di alimentazione del motore con una nuova fornitura di combustibile tramite funzionamento del motore secondo il seguente ciclo:
5 minuti a regime di minimo
5 minuti al regime di coppia massimo e 50% del carico massimo
20 minuti a regime di potenza massima e pieno carico

PROVE NELLA CONFIGURAZIONE STANDARD A (prove di apertura)

1. Esecuzione della curva di potenza del motore e determinazione dei 13 modi ESC;
2. Esecuzione delle tre ripetizioni nella CONFIGURAZIONE STANDARD A con la procedura ESC per determinare le emissioni di CO, HC, NO_x, CO₂ ed il consumo in ognuno dei 13 modi previsti. Il particolato è stato campionato in modalità single-filter, per cui i dati di emissione sono solo quelli relativi all'intero ciclo ESC. Prima della esecuzione delle tre ripetizioni di prova il sistema è stato condizionato facendo funzionare il motore secondo il seguente ciclo:
5 minuti a regime di minimo,
5 minuti al regime di coppia massimo e 50% del carico massimo,
10 minuti a regime di potenza massima e pieno carico (modo 10 del ciclo ESC per 10 minuti). Tale condizionamento permette il riscaldamento dei fluidi motore alla temperatura di almeno 80°C per l'acqua, 38±5°C per il gasolio.

PROVE NELLA CONFIGURAZIONE B

1. Installazione del dispositivo nuovo after-market sul condotto di scarico del motore.

2. Verifica che il dispositivo non crea contropressione allo scarico e quindi controllo della curva di potenza del motore;
3. Esecuzione delle tre ripetizioni nella CONFIGURAZIONE B con la procedura ESC per determinare le emissioni di CO, HC, NO_x, CO₂, il particolato PM ed il consumo in ognuno dei 13 modi previsti. Prima della esecuzione delle tre ripetizioni di prova il sistema è stato condizionato facendo funzionare il motore secondo il seguente ciclo:

5 minuti a regime di minimo

5 minuti al regime di coppia massimo e 50% del carico massimo

10 minuti a regime potenza massima e pieno carico (modo 10 del ciclo ESC per 10 minuti). Tale condizionamento permette il riscaldamento dei fluidi motore alla temperatura di almeno 80°C per l'acqua, 38±5°C per il gasolio.

PROVE NELLA CONFIGURAZIONE STANDARD A (prove di chiusura)

1. Disinstallazione del dispositivo dallo scarico del motore e controllo in alcuni punti di potenza del motore per verificare che tale dispositivo non abbia causato problemi al motore.
2. Esecuzione delle tre ripetizioni nella CONFIGURAZIONE STANDARD A con la procedura ESC per determinare le emissioni di CO, HC, NO_x, CO₂, particolato PM ed il consumo in ognuno dei 13 modi previsti. Prima della esecuzione delle tre ripetizioni di prova il sistema è stato condizionato facendo funzionare il motore secondo il seguente ciclo:

5 minuti a regime di minimo

5 minuti al regime di coppia massimo e 50% del carico massimo

10 minuti a regime di potenza massima e pieno carico (modo 10 del ciclo ESC per 10 minuti). Tale condizionamento permette il riscaldamento dei fluidi motore alla temperatura di almeno 80°C per l'acqua, 38±5°C per il gasolio.

4.7 RISULTATI SPERIMENTALI

Visto che tale protocollo veniva testato per la prima volta, si è proceduto ad effettuare una serie di prove preliminari per l'ottimizzazione delle operazioni previste dalla normativa. Infatti di seguito, nella Configurazione standard A prove di apertura, sono presentati i valori delle concentrazioni emesse e dei consumi di 5 prove invece che di 3 come previsto dal protocollo. I valori delle emissioni regolamentate in g/kWh saranno comunque effettuate sulla media di tre prove scartando le prime due prove.

Di seguito sono presentati i valori di G_{fuel} e G_{air} in kg/h misurate in tutte e 13 le modalità dei cicli ESC eseguiti (Tabelle 4.5 e 4.6 e Figure 4.3 e 4.4). Poi sono riportati i valori delle portate massiche in g/h delle emissioni (HC, NO_x, CO, CO₂) ricavate in ogni singola modalità durante i vari test

eseguiti (Tabelle da 4.7 a 4.9 e Figure da 4.5 a 4.9). Infine sono state diagrammate le temperature a monte e valle del catalizzatore, sempre modalità per modalità (Tabella 7 e Figura 11).

Gfuel [kg/h]	Valori medi prove di apertura conf. A	Valori medi prove conf. B	Valori medi prove di chiusura conf. A
1	1,406	1,403	1,395
2	25,112	25,275	25,400
3	15,360	14,950	14,927
4	21,734	21,523	21,273
5	12,495	12,453	12,242
6	18,353	18,408	18,100
7	7,023	7,138	7,043
8	28,580	28,596	28,465
9	8,846	8,863	8,729
10	31,571	31,556	31,524
11	10,523	9,844	10,291
12	24,531	24,306	24,335
13	17,369	17,300	17,277

Tabella 4.5: Valori medi di Gfuel [kg/h] misurati nelle prove con configurazione A e B

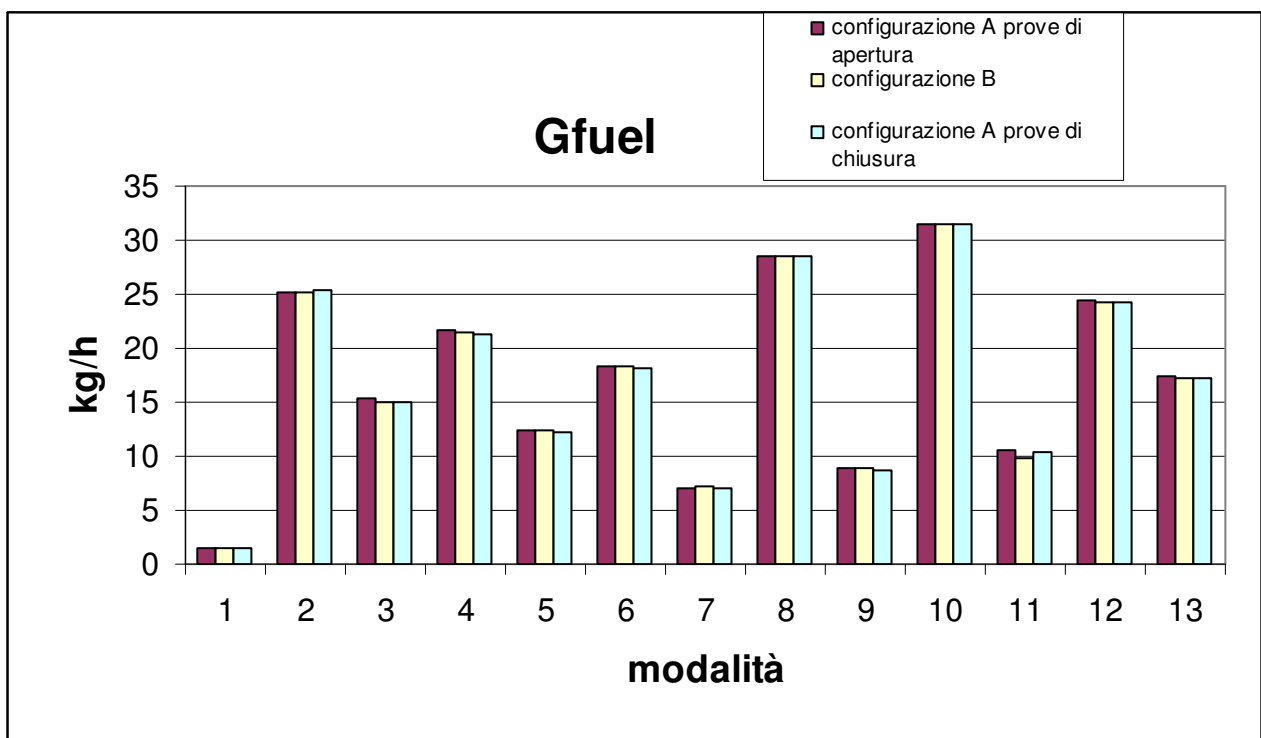


Figura 4.3: Valori medi di Gfuel [kg/h] misurati nelle prove con conf. A e B

Gair [kg/h]	Valori medi prove di apertura conf. A	Valori medi prove conf. B	Valori medi prove di chiusura conf. A
1	191,110	187,958	194,963
2	496,022	493,505	508,904
3	502,356	492,319	507,332
4	581,386	569,628	586,359
5	375,758	372,888	379,865
6	427,319	424,651	432,348
7	337,031	335,097	341,613
8	665,983	652,357	679,514
9	432,359	424,979	438,769
10	848,925	825,876	863,880
11	537,121	525,300	541,311
12	736,983	716,760	751,726
13	628,666	618,585	640,330

Tabella 4.6: Valori medi di Gair [kg/h] misurati nelle prove con conf. A e B.

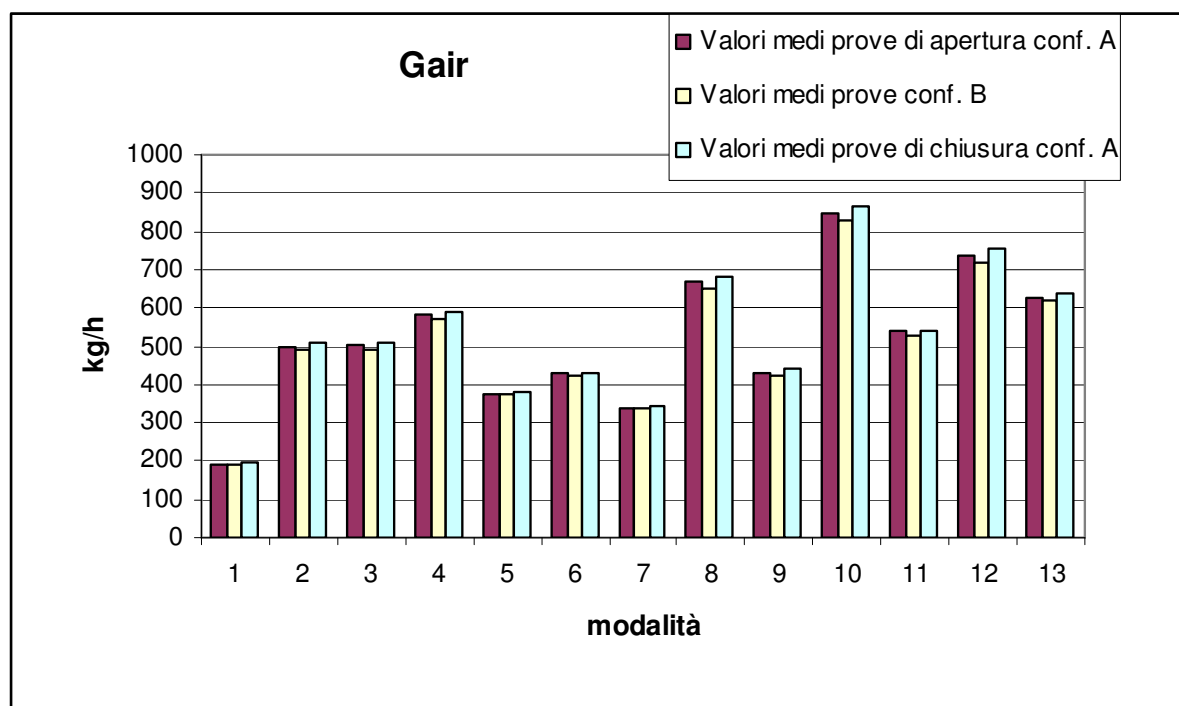


Figura 4.4: Valori medi di Gair [kg/h] misurati nelle prove con conf. A e B

HC [g/h]	Valori medi prove di apertura conf. A	Valori medi prove conf. B	Valori medi prove di chiusura conf. A
1	19,80	5,99	18,29
2	27,13	4,08	27,44
3	28,50	1,72	26,92
4	34,36	1,70	34,95
5	24,61	0,97	24,15
6	27,38	1,21	28,47
7	27,69	0,94	26,81
8	42,28	1,56	44,17
9	32,46	0,86	33,24
10	51,59	1,38	52,72
11	38,45	0,73	38,75
12	44,36	1,18	45,78
13	38,35	0,89	38,64

Tabella 4.7: Valori medi di HC [g/h] calcolati nelle prove con conf. A e B

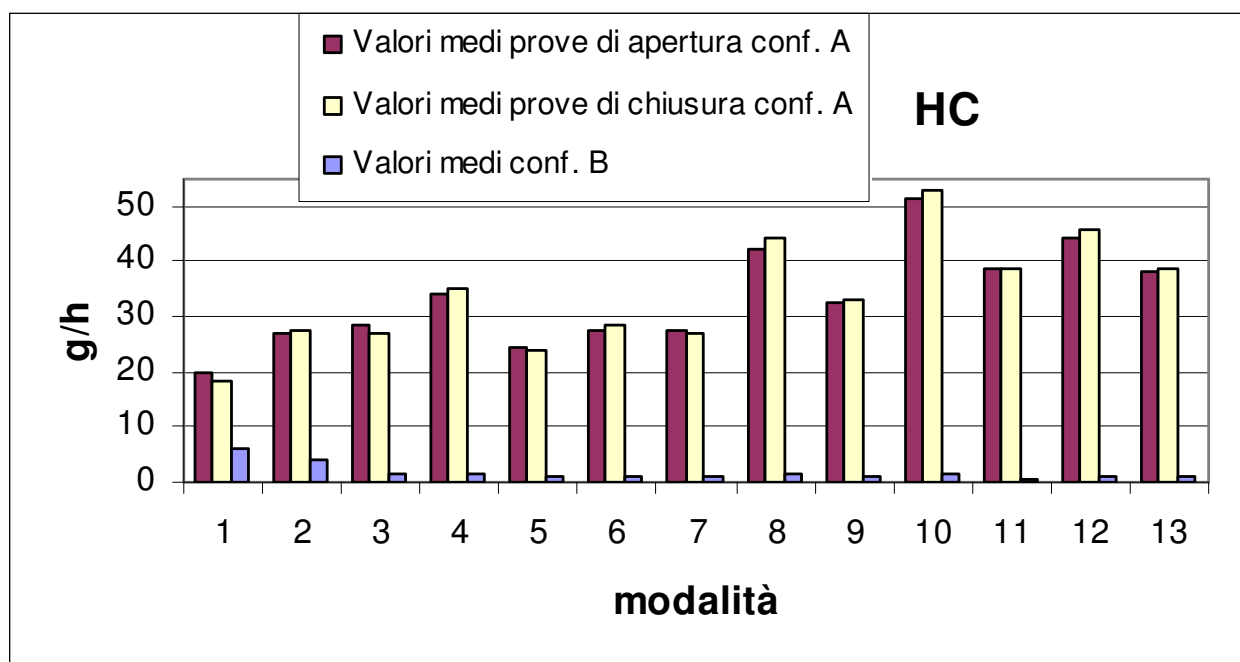


Figura 4.5: Valori emissivi medi di HC in [g/h] misurati nelle prove con conf. A e B.

NOx [g/h]	Valori medi prove di apertura conf. A	Valori medi prove conf. B	Valori medi prove di chiusura conf. A
1	68,26	65,68	60,98
2	800,98	751,21	796,15
3	827,09	748,73	806,25
4	1151,52	1038,65	1121,05
5	763,29	710,89	745,96
6	943,75	903,41	936,53
7	479,40	467,62	495,82
8	1358,44	1256,66	1354,40
9	532,39	497,78	551,88
10	1413,19	1350,51	1434,18
11	504,73	487,25	514,75
12	1121,96	1060,55	1141,19
13	807,58	782,27	815,47

Tabella 4.8: Valori medi di NOx [g/h] calcolati nelle prove con conf. A e B

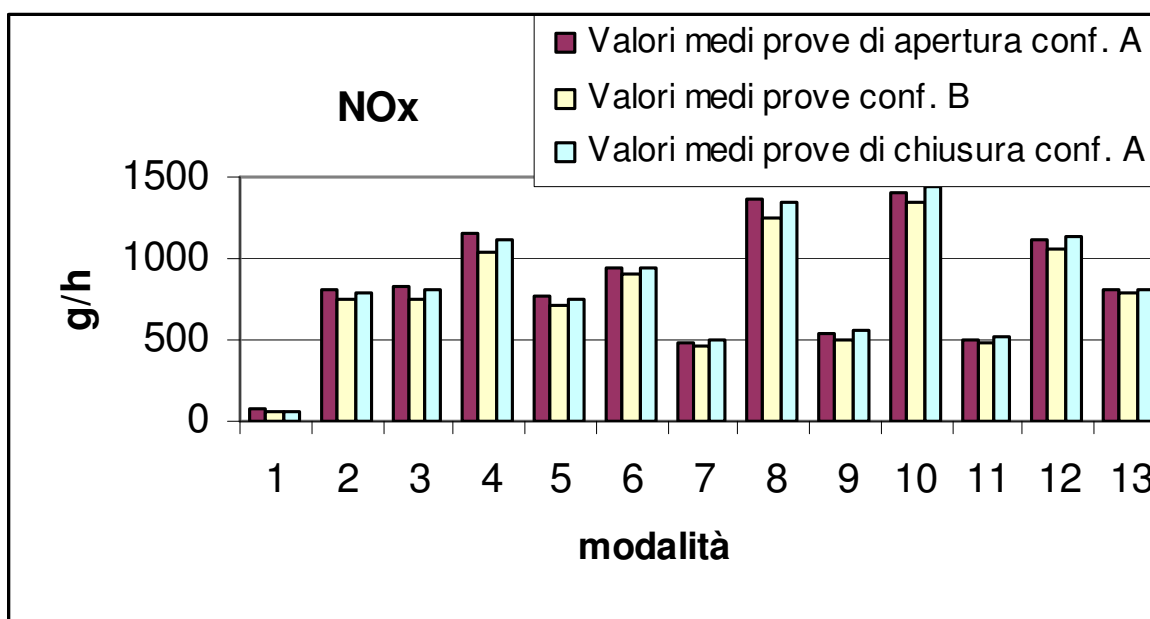


Figura 4.6: Valori emissivi di NOx in [g/h] misurati nelle prove con conf. A e B.

CO [g/h]	Valori medi prove di apertura conf. A	Valori medi prove conf. B	Valori medi prove di chiusura conf. A
1	80,70	25,82	86,67
2	1114,78	56,08	1083,07
3	41,53	5,13	39,99
4	46,39	3,51	36,45
5	32,34	2,68	25,61
6	135,97	2,59	107,09
7	39,96	2,34	39,89
8	109,85	3,86	89,67
9	48,06	3,21	47,05
10	55,40	4,53	46,82
11	65,07	2,45	62,81
12	42,60	2,78	34,97
13	44,84	2,53	36,44

Tabella 4.9: Valori medi di CO [g/h] calcolati nelle prove con conf. A e B

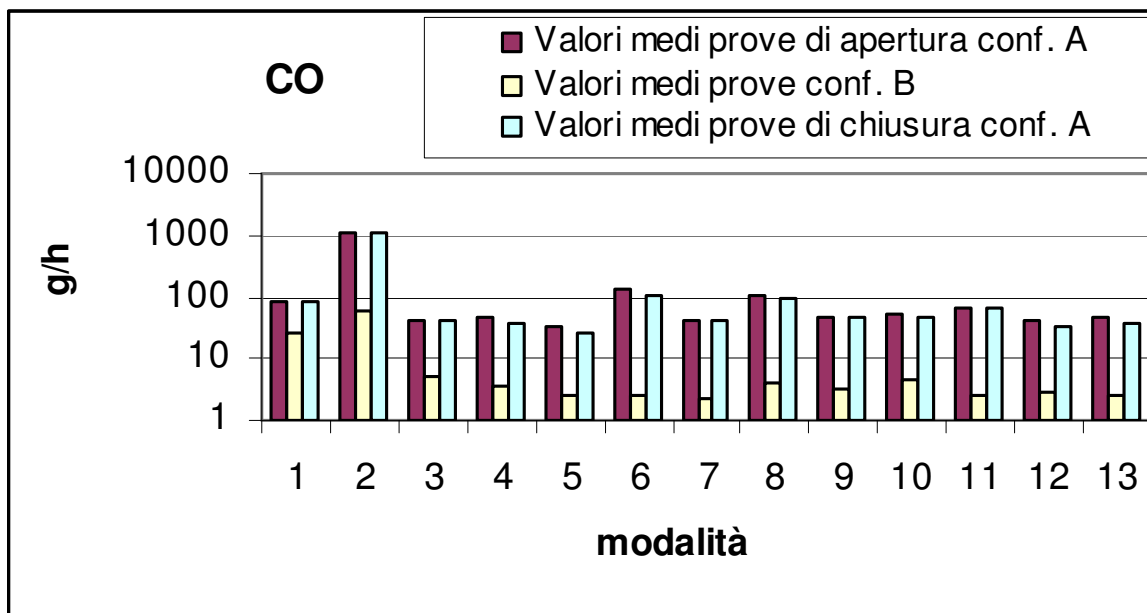


Figura 4.7: Valori emissivi medi di CO in [g/h] misurati nelle prove con conf. A e B.

CO ₂ [g/h]	Valori medi prove di apertura conf. A	Valori medi prove conf. B	Valori medi prove di chiusura conf. A
1	3958	3944	4017
2	75894	77232	79784
3	49505	49278	49125
4	68692	68737	69718
5	40323	40566	40685
6	57156	59034	58965
7	22634	23833	23326
8	90312	91227	91075
9	29678	28317	29331
10	99521	102211	102605
11	34187	33043	34689
12	77859	79338	81037
13	55150	57375	57257

Tabella 4.10: Valori medi di CO₂ [g/h] calcolati nelle prove con conf. A e B

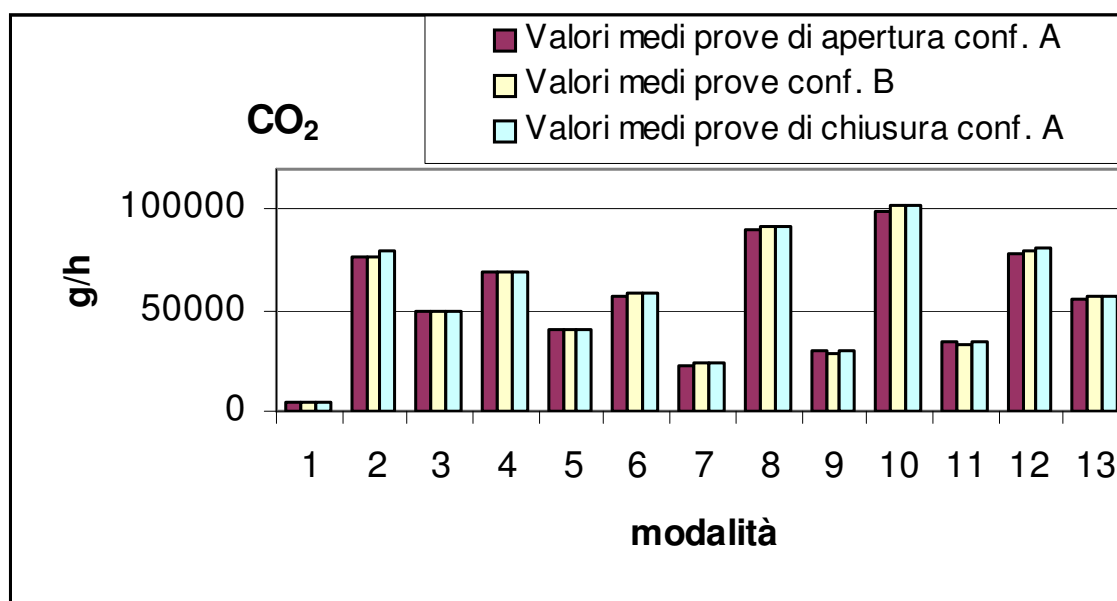


Figura 4.8: Valori emissivi medi di CO₂ in [g/h] misurati nelle prove con conf. A e B

Nella tabella 4.11 viene rappresentata la temperatura esistente a monte e a valle del catalizzatore durante la configurazione B e il valore medio delle temperature in ogni singola modalità.

	temperatura monte (T1) e valle (T2) del catalizzatore								
modalità	prova n.1			prova n.2			prova n.3		
	T1 cat	T2 cat	media	T1cat	T2cat	media	T1cat	T2cat	media
1	153,84	191,4233	172,6317	143,9867	177,6533	160,82	194,3033	271,14	232,7217
2	513,26	393,9867	453,6233	503,89	380,3733	442,1317	527,0267	425,8933	476,46
3	409,5733	833,6	621,5867	405,8433	826,2067	616,025	415,2067	847,9033	631,555
4	468,1167	437,2833	452,7	465,5667	435,6333	450,6	466,4133	438,3133	452,3633
5	425,6633	425,9633	425,8133	423,1533	423,78	423,4667	423,5167	423,4367	423,4767
6	491,8167	447,9133	469,865	499,26	454	476,63	490,4233	447,8167	469,12
7	342,1367	405,4067	373,7717	345,5	409,6867	377,5933	340,26	404,0733	372,1667
8	517,6967	466,15	491,9233	520,1867	473,09	496,6383	512,69	464,75	488,72
9	359,23	414,21	386,72	345,7533	413,13	379,4417	358,4333	411,57	385,0017
10	492,7533	458,38	475,5667	489,4	454,9	472,15	484,51	452,8967	468,7033
11	339,3233	370,9667	355,145	323,4467	364,81	344,1283	337,9	369,6467	353,7733
12	444,9	417,06	430,98	440,4267	411,3	425,8633	436,23	410,1233	423,1767
13	400,1233	396,03	398,0767	397,9333	393,87	395,9017	396,2167	392,05	394,1333

Tabella 4.11: Temperature medie monte e valle del catalizzatore nelle prove con conf. B

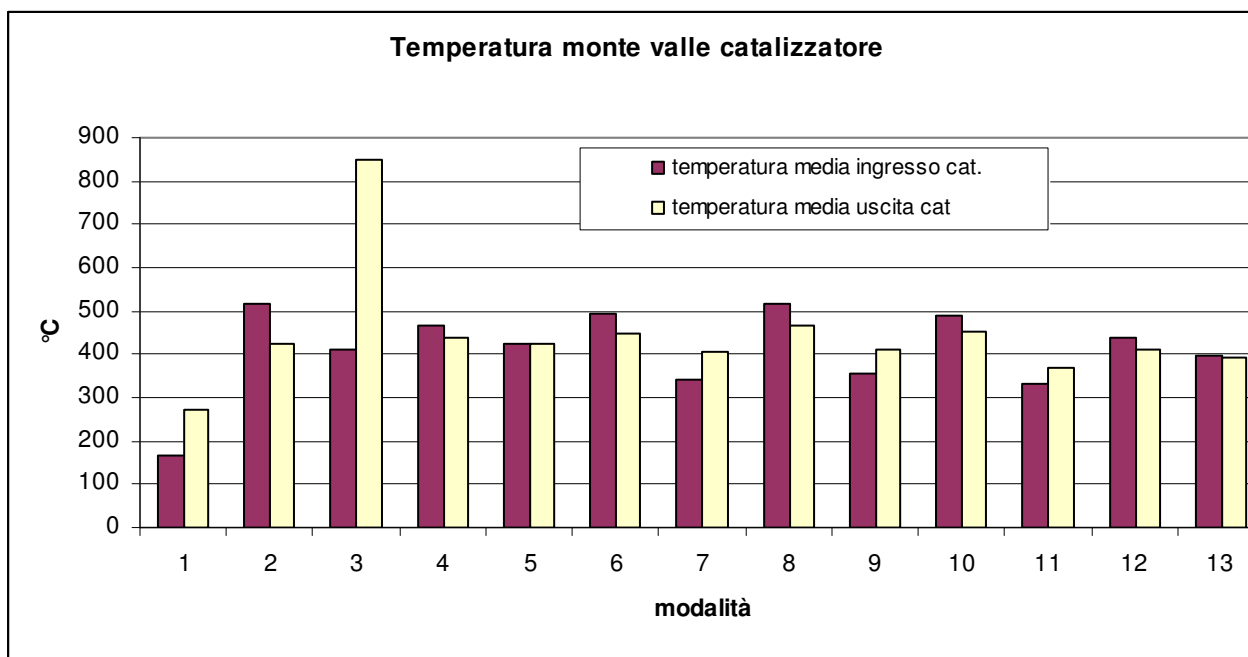


Figura 4.9: Valori di temperatura medi monte e valle del catalizzatore durante le tre prove

Come si può vedere dalla Figura 4.3 i valori di G_{fuel} , come quelli di G_{air} nella modalità 10 di massima potenza, risultano essere più alti rispetto a tutte le altre modalità e pari a circa 30 kg/h. Lo stesso motore al minimo consuma circa 1,5 kg/h di combustibile. Alla modalità 10 si riscontrano i livelli di CO_2 più elevati (Figura 4.8).

Per quel che riguarda le emissioni di inquinanti si può notare dalla tabella 4.7 che nella configurazione A standard le portate massiche più elevate di HC si hanno nella modalità 10. I valori di HC nella configurazione B con catalizzatore mostrano valori decisamente più bassi di HC, con dei valori più elevati nella modalità 1 a causa della non elevata temperatura del catalizzatore, infatti i valori di HC erano influenzati dal grado di temperatura del catalizzatore.

Le emissioni più elevate di CO si riscontrano nella modalità 2 di massima coppia, come mostrato in tabella 4.9 in cui si riscontrano condizioni di non ottimale ossidazione del monossido di carbonio, anche a causa della bassa temperatura del motore in tale modalità.

Anche per gli NO_x la modalità di massima emissione è la 10 a causa delle più elevate temperature in camera di combustione.

Dall'analisi delle temperature del catalizzatore, riportate in tabella 4.11, si nota come al minimo non si raggiunge sempre la temperatura di attivazione del catalizzatore.

Il catalizzatore, una volta riscaldato il corpo ceramico nella seconda modalità di massima coppia, presenta nella terza modalità temperature in uscita elevate (circa 800°C) rispetto a quelle di ingresso.

In tutte le altre modalità si è riscontrata una certa stabilità nelle temperature del catalizzatore.

Si passa ora ad un'analisi dei risultati delle prove in g/kWh degli inquinanti regolamentati e dei consumi specifici di combustibile.

Nella tabella 4.12 è riportata la media, la deviazione standard e lo scarto percentuale del set di prove effettuate nella configurazione standard A (prove di apertura). In questo caso è stato effettuato l'analisi dei risultati delle ultime 3 prove fatte nella configurazione standard A (prove di apertura) escludendo dalla media le prime due che come già detto precedentemente sono state effettuate per verificare il buon funzionamento di tutto l'apparato sperimentale.

valori di emissione in g/kWh						
RIPETIZIONE	NOx	CO	HC	PM	CO ₂	cs
1	10,18	1,932	0,386	0,113	638,3	212,7
2	11,03	2,180	0,465	0,120	677,1	212,2
3	9,414	1,492	0,402	0,100	701,0	212,3
media	10,21	1,868	0,418	0,111	672,1	212,4
dev std	0,810	0,349	0,041	0,010	31,66	0,271
Coeff. var. %	7,93	18,66	9,94	9,23	4,71	0,13

Tabella: 4.12: Configurazione standard A – Prove di apertura.

Nella tabella successiva 4.13 l'analisi dei valori di emissione degli inquinanti regolamentati nella configurazione B con il dispositivo after-market installato e nella tabella 4.14, i risultati delle prove di chiusura.

valori di emissione in g/kWh						
RIPETIZIONE	NOx	CO	HC	PM	CO ₂	cs
1	9,438	0,200	0,030	0,019	680	210,7
2	9,919	0,052	0,027	0,026	699	212,7
3	9,54	0,179	0,029	0,015	667,6	214,4
media	9,632	0,144	0,029	0,02	682,2	212,6
dev std	0,207	0,065	0,001	0,005	12,91	1,852
Coeff. var. %	2,15	45,33	3,74	23,18	1,89	0,87

Tabella 4.13: Configurazione B con dispositivo after-market

valori di emissione in g/kWh						
RIPETIZIONE	NOx	CO	HC	PM	CO ₂	cs
1	10,13	1,766	0,4263	0,121	678,1	210,9
2	10,44	1,795	0,416	0,107	665,2	209,4
3	9,974	1,857	0,424	0,108	705,8	209,1
media	10,18	1,806	0,422	0,112	683,0	209,8
dev std	0,194	0,038	0,004	0,006	16,94	1,061
Coeff. var. %	1,90	2,10	1,00	5,41	2,48	0,51

Tabella 4.14: Configurazione standard A –prove di chiusura.

Si può notare la più alta variabilità di CO e PM nelle prove B con il dispositivo after-market installato, spiegabile con i più bassi valori rilevati a valle del catalizzatore e condizioni di temperatura del catalizzatore non perfettamente ripetibili specialmente nella fase iniziale delle prove.

Nella tabella 4.15 sono riportati i confronti tra le emissioni relative all'allestimento di serie e quelle relative all'allestimento con il catalizzatore. In tabella sono riportati i valori delle differenze delle medie dei due set di prove (d-medie), la differenza percentuale tra le medie (d-medie %), la deviazione standard combinata (sd-Dm) ed il valore della statistica t dato dal rapporto tra d-medie e sd-Dm. Se i valori ricavati di t risultano maggiori dei valori di soglia per $\alpha=0.95$ e per $\alpha=0.90$, si può ritenere che le differenze siano statisticamente significative.

CONF A - B	NO_x	CO	HC	PM	CO₂	CS
d-medie	0,576	1,724	0,389	0,091	-10,08	-0,163
d-medie %	5,641	92,31	93,15	81,97	-1,5	-0,077
sd-Dm	0,490	0,206	0,024	0,007	20,43	1,081
t	1,175	8,351	16,22	13,45	-0,493	-0,151
SIG(.95)	NO	SI	SI	SI	NO	NO
SIG(.90)	NO	SI	SI	SI	NO	NO

Tabella 4.15: Confronto Allestimento Standard - Allestimento con Catalizzatore

Quindi risultano diminuzioni significative e di notevole entità di CO, HC e particolato PM, comprese tra l'80 e il 93 %, mentre non esistono differenze significative per NO_x, CO₂ e consumo specifico CS. In figura 4.10 un confronto normalizzato di alcuni inquinanti con e senza dispositivo.

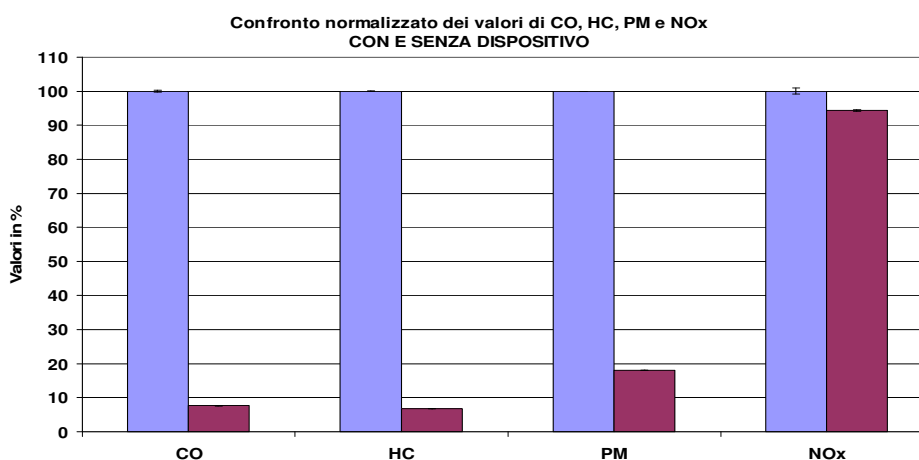


Figura 4.10: Confronto normalizzato di alcuni inquinanti.

Questi risultati sono in accordo con ciò che la casa produttrice del dispositivo dichiarava nella sua presentazione.

Nella tabella 4.16 è riportato il confronto tra la prima e rispettivamente la seconda serie di misure effettuate con la configurazione standard A del motore.

Risultano differenze significative tra i valori del consumo specifico, anche se di lieve entità, probabilmente dovute al cambio di combustibile, non appartenente allo stesso lotto.

CONF A - A	NO_x	CO	HC	PM	CO₂	CS
d-medie	-0,027	-0,062	0,004	0,001	10,92	-2,637
d-medie %	-0,263	-3,308	1,084	1,077	1,624	-1,241
sd-Dm	0,487	0,203	0,024	0,007	21,85	0,578
t	-0,055	-0,304	0,187	0,164	0,499	-4,559
SIG(.95)	<i>NO</i>	NO	NO	NO	NO	SI
SIG(.90)	NO	NO	NO	NO	NO	SI

Tabella 4.16: Confronto tra le due configurazioni standard

Nella tabella successiva invece i valori di massimi di contropressione monte e valle del catalizzatore quando sul motore è stato installato il dispositivo (Configurazione B):

NUMERO PROVE	PRESSIONE MONTE [mmH₂O]	PRESSIONE VALLE [mmH₂O]	ΔP [mmH₂O]
1	900	382	518
2	880	360	520
3	810	370	440

Tabella 4.17: Pressione monte e valle del catalizzatore

Dai valori di ΔP si nota che la contropressione si mantiene sempre sotto il valore di soglia indicato dalla ditta costruttrice di 5-6 kPa.

BIBLIOGRAFIA:

Direttiva Europea 1999/96/CE

Michael Plint, Anthony Martyr “Engine testing theory and practice” 1997

5) SPERIMENTAZIONE SU STRADA

5.1 INTRODUZIONE

Sempre più spesso si richiede di verificare l'efficacia di dispositivi su autobus mentre svolgono normale esercizio, questo perché si è visto che le prove al banco non sono rappresentative delle condizioni operative su strada. Inoltre sono pochi i centri di ricerca in grado di verificare bus su banchi a rulli per poter studiare il comportamento emissivo di un autobus mentre percorre un ciclo di guida standard. Infatti il più delle volte i motori heavy duty vengono testati su banchi freni in condizioni stazionarie, anche se per gli heavy-duty a partire dal 2000 si richiede una prova di omologazione ELR e non più solo un ciclo di prova stazionario ESC.

Verificare il funzionamento di un dispositivo installato su un bus mentre svolge normale esercizio con la stessa strumentazione di una sala prova è assai complesso anche se in letteratura esistono prove fatte su strada con banchi di analisi compatti e trasportabili. L'Istituto Motori ha optato per l'uso di un opacimetro e un fumimetro in grado di analizzare la parte carboniosa e parte degli idrocarburi del particolato. Poiché i dispositivi aftermarket incidono sui consumi per l'aumento della contropressione allo scarico generata dai dispositivi stessi, si è svolto un protocollo per l'analisi dei consumi degli autobus mentre svolgono normale esercizio.

5.2 Descrizione della strumentazione utilizzata per la sperimentazione

La sperimentazione su strada che ha interessato tre città italiane (Napoli, Palermo e Lecce), è consistita nell'analizzare l'opacità e la fumosità allo scarico, acquisire una serie di parametri motoristici e non, e valutare i consumi su un autobus in normale servizio di linea.

Per il rilievo di alcuni parametri motoristici e non, per la valutazione del consumo e delle emissioni di particolato, i bus sono stati di volta in volta allestiti con:

1. Rack
2. Opacimetro
3. Fumimetro
4. Controllore remoto
5. contagiri
6. flussometro
7. GPS
8. termocoppie
9. scheda di acquisizione
10. computer
11. batterie
12. gruppi di conversione
13. quadro elettrico
14. zavorra

1. Rack

Si è realizzato un rack per l'alloggiamento di alcuni strumenti con dimensioni di ingombro di circa $80*60*190\text{ cm}^3$. Anche se l'azienda produttrice dell'opacimetro e del fumimetro (AVL) garantiva che tali strumenti erano adatti ad una sperimentazione su strada, per evitare brusche oscillazioni è stato progettato un sistema che permettesse agli strumenti di oscillare smorzando in verticale le accidentalità del pavimento stradale ed in orizzontale le variazioni di direzioni che il bus fa quando è su strada.

Per risolvere questo problema, che avrebbe potuto danneggiare gli strumenti, sono state disposte una serie di molle di opportuna rigidità che da un lato permette di far oscillare la strumentazione, smorzando gradualmente l'energia che ha accumulato, e dall'altro di mantenerla fissa grazie ad un ulteriore telaio rigido (particolare 1 di figura 5.2).

2. Opacimetro

L'opacimetro è uno strumento AVL 439 con le seguenti caratteristiche:

Intervallo di misura $N=0-100\%$ o $k=0-10\text{ m}^{-1}$,

risoluzione 0.1% o 0.0025 m^{-1} ,

tempo di risposta 0.1 secondi,

alimentazione 220 Volts

Tale strumento (vedi schema di figura 5.1) ha una camera di misura di lunghezza definita e superfici non riflettenti dentro il quale viene fatto passare in continuo il gas di scarico prelevato da un sonda riscaldata. La perdita di intensità di un raggio di luce tra una lampada sorgente e una lampada che riceve, viene misurata e da tale misura viene calcolata l'opacità del gas di scarico. Nel particolare 2 di figura 5.2 si vede la sua disposizione all'interno del rack.

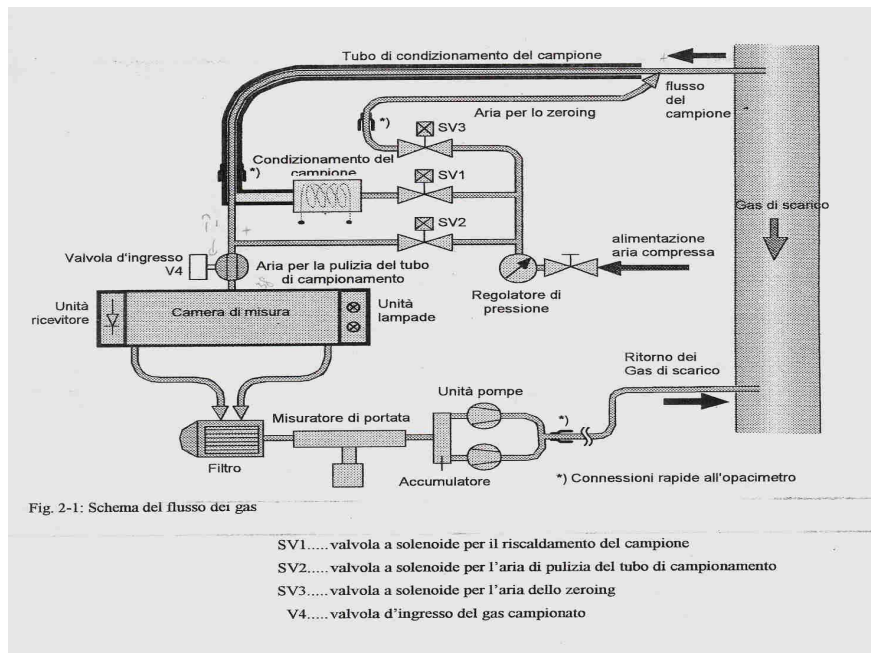


Fig. 5.1: schema dei flussi interni dell'opacimetro AVL 439.

Per funzionare correttamente ha bisogno di aria compressa (circa 90 l/min a 4 bar), che serve per il riscaldamento delle sonde, riscaldamento della camera di misura e per fare un controllo periodico (ogni 30 minuti circa) del punto di valore 0 di opacità. L'aria compressa è stata prelevata direttamente dai serbatoi dell'impianto di servizio che comanda l'apertura e la chiusura della porta posteriore del veicolo (particolare 3 di figura 5.2).

3. Fumimetro

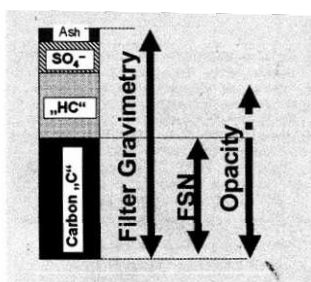
Il fumimetro è uno strumento AVL 415S con le seguenti caratteristiche:

Intervallo di misura 0-10 FSN,

risoluzione 0,01 FSN,

alimentazione 220Volts.

Tale strumento (particolare 4 di figura 5.2), permette, per mezzo di una sonda, di campionare i gas di scarico ed analizzare la luce che si riflette su un filtro di carta attraversato dai gas, dando una misura indiretta della massa di particolato carbonioso presente nei gas di scarico. Questo tipo di strumento effettua una misura ogni 30 secondi circa, di cui 4-5 s relativi al prelievo di un litro di gas ed i restanti per la pulizia dell'intera linea.



La misura dell'opacità e della fumosità danno informazioni indirette, ma complementari, sulla quantità di particolato presente nei gas di scarico. In particolare la misura di fumosità (FSN) è relazionata alla quantità di soot (fuliggine) presente nei gas di scarico mentre la

misura di opacità (Opacity) è influenzata dalla presenza di idrocarburi e dalla eventuale presenza di N_2O , come evidenziato nella immagine affianco.

4. Controllore Remoto

Controllore remoto per fumimetro ed opacimetro.

Tale dispositivo (particolare 5 di figura 5.2) permette di controllare separatamente l'opacimetro e il fumimetro (l'alimentazione elettrica è fornita da uno dei due strumenti).

5. Contagiri

Contagiri Diesel 874 AVL.

Tale dispositivo permette di leggere il numero dei giri del motore (intervallo 120–6000g/min) attraverso un trasduttore di pressione, posto sulla cannetta dell'iniettore del 1° cilindro del motore. Rilevando la variazione di pressione che si ha sulla cannetta, ad ogni iniezione di gasolio in camera di combustione del 1° cilindro, si risale alla velocità di rotazione del motore. Di tale strumento (alimentazione 8,5-35Volts D.C.), ne è visibile una parte posta all'interno del vano passeggeri (particolare 6 di figura 5.2).

6. Flussometro

Flussometro EDM 1403 della VDO KIENZLE.

Tale strumento permette di avere una valutazione delle portate di combustibile consumate dal motore. Tale dispositivo è allocato sulla linea di alimentazione a monte della pompa di iniezione, rileva il consumo di gasolio con metodo volumetrico.

Inoltre per proteggere il flussometro da impurità presenti nel gasolio che possono bloccarlo, è stato posto a monte del flussometro un ulteriore filtro di gasolio. (particolare di figura 5.3).

7. GPS

GPS – Global Position System.

Tale strumento, il cui sensore è stato posto sul tetto dell'autobus, permette di rilevare la posizione del bus ogni secondo e di valutare anche la velocità e l'accelerazione del mezzo.

8. Termocoppie di tipo K

Tali termocoppie sono state utilizzate per la misura della temperatura dei gas di scarico.

Una è posta subito a valle dello scarico del motore, e l'altra a valle del dispositivo o silenziatore.

9. Scheda di acquisizione

Tale scheda ha permesso di acquisire ed elaborare tutti i dati di seguito elencati con frequenza di campionamento di 1 Hz (particolare 7 di figura 5.2):

- Segnale GPS
- Consumo
- Termocoppia gas di scarico monte
- Termocoppia gas di scarico valle
- Segnale tachimetrico preso dal tachimetro dell'autobus
- Contagiri
- Opacimetro
- Tempo UTC trascorso

10. 2 Computer portatili.

Sono stati utilizzati due computer portatili. Con un computer sono stati acquisiti tutti i segnali elaborati dalla scheda di acquisizione utilizzando un opportuno software. Tale computer acquisisce anche i valori di fumosità letti dal fumimetro attraverso un software sviluppato dall'AVL.

Con il secondo PC portatile sono stati acquisiti, per mezzo di un opportuno software dell'AVL, i valori di opacità letti dallo strumento.

11. Batterie

Si sono portate a bordo una serie di batterie per l'alimentazione a 12 e 24 Volts, necessaria agli inverter per l'alimentazione di alcuni strumenti in A.C. e per l'alimentazione di altri strumenti a 12-24Volts D.C. (particolare 8 di figura 5.2).

12. Inverter

Gruppi di conversione DC/AC (12-220Volts, 24-220Volts).

Questi due dispositivi permettono separatamente di convertire e trasformare l'alimentazione ricavata dalle batterie 12 - 24Volts in corrente continua D.C., in corrente alternata 220Volts A.C. necessari ad alcuni strumenti. (particolare 9 di figura 5.2).

13. Quadro elettrico

Tale quadro, ha la funzione di interruttore del sistema elettrico e permette anche di controllare lo stato di tensione delle batterie attraverso due indicatori.

14. Zavorra

La zavorra ha la funzione di simulare un certo numero fisso di passeggeri sul bus durante tutta la sperimentazione con e senza dispositivo. (figura 5.5).

Di volta in volta si specifica la zavorra utilizzata sui bus nelle tre aziende.



Fig. 5.2: Disposizione di vari strumenti all'interno di un bus

5.3 Analisi dei consumi

Analisi dei consumi dai dati raccolti giornalmente

La prima parte della sperimentazione ha interessato la valutazione dei consumi di una flotta di mezzi utilizzando i dati acquisiti giornalmente da alcune aziende di trasporto italiane.

Sono state coinvolte sette aziende di trasporto con i seguenti mezzi:

- 6 bus di AGI S.p.A. Provincia Milano,
- 4 bus di AMAT S.p.A. Palermo,
- 12 mezzi di APS Padova,
- 2 bus ATM S.p.A. Milano,
- 8 bus di CTP S.p.A. Napoli,
- 2 bus di RAMA S.p.A. Grosseto,
- 7 bus di SGM S.p.A. Lecce.

Ogni azienda partecipante alla sperimentazione ha condotto un programma di monitoraggio del funzionamento e del consumo dei mezzi attraverso la compilazione di questionari che settimanalmente spedivano via e-mail.

Su alcuni dei mezzi messi a disposizione da un certo momento in poi, è stato installato un dispositivo aftermarket e per poter valutare gli effetti sul consumo di combustibile, è stato necessario suddividere i mezzi di ogni singola azienda in due flotte:

- Flotta SD su cui da un certo momento in poi è stato installato un dispositivo,
- Flotta R di riferimento che serve a stabilire una baseline di riferimento per tutto il periodo della sperimentazione. Su questa flotta non è stata effettuata alcuna misura e installazione di dispositivi.

Il monitoraggio è stato effettuato riportando i dati osservati su un apposito questionario. Tale questionario aveva lo scopo di monitorare tra l'altro i consumi medi (indicando i chilometri e i litri rabboccati al momento del rifornimento) per ogni mezzo durante il suo utilizzo, linea/e percorsa/e nella giornata, eventuali anomalie di funzionamento o comportamento. Era stato inoltre richiesto alle aziende di impegnare questi mezzi sempre sulla stessa linea per quanto possibile nell'intero periodo di sperimentazione dei questionari. Tale richiesta non è stata soddisfatta da tutte le aziende. I questionari compilati giornalmente dalle aziende di trasporto hanno interessato il periodo 19 maggio – 16 novembre 2003.

Per tutte le aziende in questo periodo si è svolto il “periodo di bianco”, cioè il periodo in cui tutti i mezzi Flotta SD e Flotta R hanno girato senza alcun dispositivo installato, ed il “periodo di sperimentazione”, cioè il periodo in cui i mezzi SD hanno girato con un dispositivo installato.

Nel complesso sono stati analizzati i questionari ricevuti relativi ai 41 veicoli oggetto della sperimentazione (25 appartenenti alla flotta SD e 16 alla flotta R), per le ventisei settimane del periodo 19 maggio – 16 novembre 2003. Si tratta di circa 1045 questionari con circa 7300 dati giornalieri complessivi di consumo.

Nella valutazione dei dati medi ricavati dai dati riportati in tutti i questionari e ritenuti “validi” si è usato il seguente criterio

A) Controllo dei dati in relazione alle informazioni disponibili sui questionari

1. Il dato del giorno è valido se il veicolo è uscito su strada;
2. Il dato del giorno è valido se vi sono informazioni sufficienti (km percorsi, orario di utilizzo);
3. Il dato del giorno è valido se non vi sono segnalati malfunzionamenti;

B) Individuazione di eventuali outlier

4. Il dato del giorno è escluso se risulta essere un “outlier”, cioè un dato che appare essere inconsistente con il resto del set di dati o che devia così tanto dagli altri dati che può nascere il sospetto di essere stato generato da un errore. In tutte le procedure che coinvolgono osservazioni di valori reali ($X_1 \dots X_n$) ci possono essere k outliers quando $n-k$ osservazioni “regolari” sono compatibili con un dato modello statistico e le rimanenti osservazioni k producono dei residui rispetto al valore medio che sono più grandi, in valore assoluto, di quelli corrispondenti ad ogni osservazione regolare. Per la valutazione degli outlier si è utilizzato il programma Statgraphics Plus 5.0 e per la loro identificazione una metodologia basata sulla deviazione assoluta della mediana (MAD).

Nella tabella successiva si riportano alcune caratteristiche della flotta di bus, escludendo dall’analisi le informazioni e i dati dei mezzi per la raccolta dei rifiuti dell’APS vista la diversa tipologia di mezzo:

<i>Azienda</i>	<i>sigla identificativa</i>	<i>categoria veicolo</i>	<i>cilindrata</i>	<i>potenza kW</i>	<i>normativa di riferimento</i>	<i>Motore sovralime ntato</i>
AGI	S13	M3-A3	13,8	220	0	SI
	S14	M3-A3	13,8	220	0	SI
	S15	M3-A3	13,8	190	0	NO
	S16	M3-A3	13,8	190	0	NO
	S17	M3-A3	9,5	250	1	SI
	S18	M3-A3	9,5	250	1	SI
AMAT	S9	M3-A2	7,7	196	2	SI
	S10	M3-A2	7,7	196	2	SI
	S11	M3-A2	7,7	196	2	SI
	S12	M3-A2	7,7	196	2	SI
ATM	S19	M3-A2	9,5	154	0	SI
	S29	M3-A2	9,5	154	0	SI
CTP	S1	M3-A2	9,5	154	0	SI
	S2	M3-A2	9,5	154	0	SI
	S3	M3-A2	9,5	154	0	SI
	S4	M3-A2	9,5	154	0	SI
	S5	M3-A2	9,5	154	0	SI
	S6	M3-A2	9,5	154	0	SI
	S7	M3-A2	9,5	154	0	SI
	S8	M3-A2	9,5	154	0	SI
RAMA	S21	M3-A5	9,5	176	0	SI
	S22	M3-A5	9,5	176	0	SI
SGM	S23	M3-A2	4,6	114	1	SI
	S24	M3-A2	4,6	114	1	SI
	S25	M3-A2	4,6	114	1	SI
	S26	M3-A2	4,6	114	1	SI
	S27	M3-A2	4,6	114	2	SI
	S28	M3-A2	4,6	114	2	SI
	S29	M3-A2	4,6	114	2	SI

Tabella 5.1: Descrizione dei bus coinvolti nella sperimentazione.

Come si può notare gli autobus sono quasi tutti con turbo, con potenza maggiore di 150 kW tranne per i bus di SGM che hanno motori con una potenza di 114 kW. Questi sono bus M230 della Bredamenarinibus con lunghezza inferiore ai 12 metri.

Dalla tabella in alto si notano che nella sperimentazione erano coinvolti bus di diversa categoria.

Si passa ora ad una descrizione delle varie categorie dei veicoli impegnati:

Categoria M: veicoli a motore destinati al trasporto di persone ed aventi almeno quattro ruote:

categoria M1: veicoli destinati al trasporto di persone, aventi al massimo otto posti a sedere oltre al sedile del conducente;

categoria M2: veicoli destinati al trasporto di persone, aventi più di otto posti a sedere oltre al sedile del conducente e massa massima non superiore a 5 t;

categoria M3: veicoli destinati al trasporto di persone, aventi più di otto posti a sedere oltre al sedile del conducente e massa massima superiore a 5 t;

Categoria A: veicolo adibito ad un determinato percorso:

categoria A2: tratta urbana;

categoria A3: tratta extraurbana;

categoria A5: tratta suburbana.

Per ogni azienda e per ogni veicolo sono state elaborati le percorrenze e i consumi medi relativi ai due periodi considerati (“di bianco” e “di sperimentazione”), ma nella tabella successiva vengono presentati i dati elaborati relativi solo al periodo di bianco.

Mediamente i mezzi di trasporto pubblico analizzati percorrono intorno ai 250 km/giorno, lavorano tra 5 e 7 giorni a settimana e non tutti i giorni le aziende fanno fare rifornimento ai propri mezzi.

I dati di consumo come si può notare dalla tabella successiva variano abbastanza, infatti si va da 1,66 chilometri percorsi con un litro di gasolio per un bus di AMAT a 3,03 km/l fatto dagli autobus di SGM che come abbiamo detto sono bus di lunghezza inferiore rispetto agli autobus della flotta considerata. Valori di consumo maggiori di 2,5 km/l si sono anche ottenuti da bus di AGI, però è da ricordare che questa azienda percorre tratte prevalentemente extraurbane (categoria A3) e quindi con meno stop and go. Inoltre si può notare che il bus di CTP e ATM che sono bus omologati prima dell’anno 1992, hanno dati di consumo molto simili.

Questi dati di consumo sono in linea con i valori medi di 2 e 2,5 km/l riportati in letteratura.

Azienda	sigla identificativa	km percorsi in tale periodo	km medi giornalieri	consumo medio in tale periodo [km/l]	N° dati consumo validi	giorni senza dati di consumo
AGI	S13	8568	180	2,37	18	16
	S14	8556	192	2,58	11	18
	S15	12068	236	2,76	36	5
	S16	6817	195	2,67	18	7
	S17	4126	165	2,85	6	9
	S18	7766	168	3,14	17	20
AMAT	S9	25781	259	2	89	
	S10	17828	251	2	64	
	S11	28026	188	1,66	139	2
	S12	31635	215	1,86	139	
ATM	S19	8591	231	2,22	31	1
	S29	9094	211	2,2	31	
CTP	S1	14370	206	2,22	61	1
	S2	1718	175	2,07	8	
	S4	3080	294	2,35	9	
RAMA	S21	11773	324	2,66	35	
	S22	10673	300	2,81	35	
SGM	S23	25358	236	2,86	102	8
	S24	26206	188	3,03	117	9
	S25	19801	230	3,09	76	3
	S26	5579	214	2,98	24	1
	S27	2125	246	3,5	8	
	S28	2097	224	2,91	9	
	S29	17321	230	2,79	65	3

Tabella 5.2: Valutazione dei consumi dei bus coinvolti.

Analisi dei consumi di alcuni bus zavorrati mentre svolgono un percorso urbano

Durante la fase di sperimentazione su strada, 7 bus della flotta dei 41 mezzi impegnati sono stati di volta in volta strumentati con un flussometro (particolare di figura 5.3) per la misura del consumo di combustibile con e senza dispositivo installato.

Di volta in volta il bus strumentato e zavorrato con un peso costante, seguiva un bus che svolgeva normale esercizio di linea con i relativi stop and go alle fermate. La linea veniva di volta in volta concordata con l'azienda di turno ed era sempre diversa dalla linea percorsa mediamente dal bus durante la misura dei consumi fatta con i questionari.

Le aziende e i bus coinvolti in questa fase di sperimentazione sono:

- bus S1 e S5 di CTP Napoli,
- bus S9 e S11 di AMAT Palermo,
- bus S23, S28 e S29 di SGM di Lecce.

In figura 5.3 una tipica installazione del flussometro nel vano motore.



Figura 5.3: Particolare del flussometro

Gli impulsi emessi da tale dispositivo e proporzionali al consumo di combustibile del mezzo, sono stati gestiti da una scheda e acquisiti da uno dei due PC portatili adibiti all'acquisizione di tutti i segnali.

Le valutazioni dei consumi che si presentano fanno riferimento ad uno solo dei tre dispositivi aftermarket provati in ognuna delle tre città, inoltre i dati sono riferiti all'intero percorso pianeggiante scelto di volta in volta con l'azienda con e senza il dispositivo installato.

Per la città di Napoli abbiamo scelto il tratto di 16.6 km Sferisterio Piazza Garibaldi - Piazza Garibaldi Edenlandia percorsa dalla linea M1NB.

Gli autobus a Napoli durante tutta la sperimentazione su strada sono stati guidati sempre dallo stesso autista e la zavorra era circa di 3,8 tonnellate, simulando un carico di persone pari al 50%

massimo trasportabile. In tabella successiva i valori del flussometro elaborati con e senza dispositivo nella città di Napoli. Come si può notare nella terza prova fatta con il dispositivo non c'è il dato di consumo medio, perché si è avuto un problema con la scheda di acquisizione che è rimasta scollegata durante il percorso per circa 13 minuti.

Consumi con flussometro tratto urbano di Napoli con e senza dispositivo aftermarket su bus S1			
Consumo su intero percorso		media	dev.std
1° s. dispositivo	1,708	1,809	0,133
2° s. dispositivo	1,760		
3° s. dispositivo	1,959		
1° con dispositivo	1,765	1,716	0,069
2° con dispositivo	1,668		
3° con dispositivo			

Tabella 5.3: Valutazione del consumo con e senza dispositivo per CTP.

Per la città di Palermo abbiamo scelto il tratto di 11 km P.za Giotto-Stazione-P.za Giotto percorsa dalla linea 102 circolare.

Gli autobus a Palermo durante tutta la sperimentazione su strada sono stati guidati sempre dallo stesso autista e la massa di zavorra era circa di 1,8 tonnellate simulando un carico di circa 25 persone. In tabella 5.4 i valori rilevati con il flussometro con e senza dispositivo installato.

Consumi con flussometro tratto urbano di Palermo con e senza dispositivo aftermarket su bus S9			
Consumo su intero percorso		media	dev.std
1° s. dispositivo	1,870	1,782	0,100
2° s. dispositivo	1,674		
3° s. dispositivo	1,802		
1° con dispositivo	1,817	1,752	0,058
2° con dispositivo	1,705		
3° con dispositivo	1,733		

Tabella 5.4: Valutazione del consumo con e senza dispositivo per AMAT.

Per la città di Lecce per finire abbiamo scelto il tratto di 17 km Zona 167-Stazione-Zona 167 percorsa dalla linea 25 circolare.

A Lecce invece gli autobus erano guidati sempre da autisti diversi e la massa di zavorra era circa di 1,2 tonnellate simulando un carico di circa 16 passeggeri. In tabella 5.5 i valori rilevati con il flussometro con e senza dispositivo installato.

Consumi con flussometro tratto urbano di Lecce con e senza dispositivo aftermarket su bus S29			
Consumo su intero percorso		media	dev.std
1° s. dispositivo	3,192	3,045	0,145
2° s. dispositivo	3,039		
3° s. dispositivo	2,902		
1° con dispositivo	3,447	3,017	0,389
2° con dispositivo	2,691		
3° con dispositivo	2,912		

Tabella 5.5: Valutazione del consumo con e senza dispositivo per SGM.

Il dispositivo come ci si aspettava ha fatto variare il consumo tra l'1 e il 5% (tabella 5.6) e la maggiore differenza dei consumi si è avuto per CTP. L'azienda produttrice del dispositivo, visto che il bus S1 di CTP era stato omologato prima dell'anno 1992, per riuscire ad abbattere il particolato con le stesse performance, ha dovuto creare un filtro catalizzato formato da due unità separate: il catalizzatore a monte del filtro e poi a valle il filtro.

	CTP BUS S1		AMAT BUS S9		SGM BUS S29	
	Media	dev.std	Media	dev.std	Media	dev.std
Media di 3 prove senza dispositivo	1,809	0,133	1,782	0,100	3,045	0,145
Media di 3 prove con dispositivo	1,716	0,069	1,752	0,058	3,017	0,389
Scarto % medie	5,15		1,68		0,92	

Tabella 5.6: Tabella riassuntiva dei valori medi ottenuti.

5.4 VALUTAZIONE DEL FUNZIONAMENTO DEI DISPOSITIVI RELATIVAMENTE ALL'ABBATTIMENTO DELLE EMISSIONI DI PARTICOLATO

Oltre alla valutazione del consumo di combustibile nelle città coinvolte nella sperimentazione su strada, si è valutato il funzionamento dei dispositivi relativamente all'abbattimento delle emissioni di particolato.

La sperimentazione su strada ha coinvolto sette bus di diverso tipo e classe di omologazione, ed è stata condotta secondo un piano sperimentale previsto per ogni città e per ogni bus su cui è stato installato un dispositivo.

I percorsi scelti sono stati:

un percorso extra-urbano con un tratto a velocità costante;

tre ripetizioni di un percorso urbano, parte di un percorso di linea;

sia con che senza il dispositivo installato.

Nell'esecuzione del percorso urbano, il bus strumentato ha seguito un bus in normale servizio passeggeri per riprodurre, il più fedelmente possibile, il comportamento di guida reale degli autobus in servizio.

La stima dell'effetto dei dispositivi sulle emissioni di particolato è stata effettuata confrontando le misure di opacità e fumosità con e senza dispositivo per ogni bus coinvolto. La misura dell'opacità, acquisita con la frequenza di 1 Hz, è valida in tutte le condizioni di marcia, invece la misura della fumosità, che è condotta ogni 30 secondi, ha un significato solo nei tratti a velocità costante.

Il confronto è stato effettuato a parità di prestazione, ovvero a parità di potenza erogata e di velocità. In altri termini, considerato il fatto che il carico passeggeri è stato simulato con una zavorra, il confronto è stato effettuato a pari profilo di velocità/accelerazione ed in strade ad uguale pendenza; la pendenza ha infatti per i mezzi pesanti un effetto importante su consumi ed emissioni. Dei dati acquisiti nella sperimentazione su strada sono stati quindi considerati per questa attività:

- la serie storica della velocità del bus;
- la serie storica dell'opacità;
- la serie storica della posizione e della velocità acquisite dal GPS;
- la serie storica della fumosità per i tratti a velocità costante.

Percorsi extra-urbani

Per ogni bus, con e senza dispositivo, è stato effettuato un percorso extra-urbano con il raggiungimento di un regime di massima velocità costante. In questi percorsi si sono selezionati i segmenti in cui la velocità si è potuta considerare costante dall'esame dei rilievi della velocità e del numero di giri del motore che assicuravano una costanza del carico del motore. Per ciascun percorso è stato determinato un file dati delle grandezze velocità, opacità, fumosità per i segmenti a velocità costante. Da questo file dati si è ricavato un valore medio di opacità ogni trenta secondi, tempo al quale è disponibile la misura di fumosità e si è determinato quindi un campione di misure di opacità e di fumosità per ogni percorso extra-urbano effettuato con il quale si è valutato l'effetto del dispositivo sulla fumosità, supportata dai valori di opacità.

Percorsi urbani

Il profilo di velocità del bus nel tempo varia continuamente in conseguenza delle fermate, del servizio passeggeri, degli incroci semaforizzati e non, delle pendenze stradali, delle condizioni di traffico e dello stile di guida dell'autista.

L'analisi è stata condotta nelle tre città individuando condizioni operative dei mezzi analoghe per velocità ed accelerazione ed effettuando il confronto dell'opacità corrispondente con e senza dispositivo. Dall'analisi dei tre percorsi con e tre percorsi senza dispositivo, per ogni città e per ogni configurazione del bus, si è scelto una manovra simile. Per manovra simile con e senza dispositivo, si intende che il bus parte da fermo, raggiunge una certa velocità per ritornare dopo un intervallo di tempo a velocità nulla con un profilo simile di velocità. Poiché delle tre città, Napoli e Palermo presentano una variazione altimetrica significativa, mentre Lecce si può considerare del tutto pianeggiante, per Napoli e Palermo sono state considerate le localizzazioni delle misure, mentre nel caso di Lecce si è fatta l'assunzione di pendenza nulla su tutto il percorso e quindi il confronto è stato effettuato per condizioni analoghe di funzionamento ma su tutto il percorso.

5.5 INSTALLAZIONE DEI DISPOSITIVI E PERCORSI SCELTI PER LE TRE CITTA'

DEFINIZIONE SPERIMENTAZIONE PRESSO CTP DI NAPOLI

La sperimentazione su strada ha avuto inizio con CTP di Napoli che ha messo a disposizione i bus con numero identificativo S1 e S5. Si presenteranno i dati ottenuti dal bus S1, bus sul quale è stato provato il dispositivo.

Percorsi selezionati:

Una indicativa localizzazione dei percorsi selezionati è rappresentata in figura 5.4:

- sperimentazione a velocità costante: tratto sulla variante a scorrimento veloce Cuma-Castelvolturmo (indicata nel cerchio rosso);
- sperimentazione nel traffico urbano della città di Napoli (cerchio blu): linea MN1B nel suo tratto urbano tra Piazza Garibaldi e Fuorigrotta e ritorno.



Figura 5.4: Localizzazione dei percorsi seguiti con CTP di Napoli.

I bus oggetto della sperimentazione sono stati caricati con circa 190 sacchetti dal peso di circa 20 kg ciascuno, forniti dalla stessa azienda di trasporto, per simulare un carico pari approssimativamente al 50% del carico massimo di persone. In figura 5.5 è riportata l'interno del bus con la zavorra impiegata.



Figura 5.5: Foto del bus con la zavorra utilizzata presso CTP

Installazione del dispositivo a Napoli

Il dispositivo è stato provato praticamente nuovo in quanto dopo essere stato installato è stato portato in Istituto per iniziare la sperimentazione. Esso risultava formato da due parti separate, un

catalizzatore ossidante ed il filtro alloggiato nella parte sottostante il mezzo, al posto della marmitta originale.

Inoltre l'azienda aveva installato, così come richiesto, un sensore di contropressione a monte del dispositivo per segnalare l'eventuale superamento di un valore di contropressione di 200 mbar. Questo dispositivo tramite due indicatori luminosi segnalava lo stato di preallarme e di allarme. Lo stato di preallarme era visibile attraverso l'accensione di un led giallo ed indicava il raggiungimento di una contropressione allo scarico di 200 mbar per più di 30 secondi. Se tale contropressione durava per più di 5 minuti si accendeva anche l'altro led rosso che indicava uno stato di allarme che avrebbe richiesto un intervento sul dispositivo. Tali led durante le prove su strada con il dispositivo, erano stati portati nel vano passeggeri per poterli monitorare e durante la prima prova si è avuto un problema al sensore di pressione, quindi non siamo stati in grado di valutare la contropressione creata dal dispositivo che per il bus S1 era formato da due parti.

Per il collegamento delle due sonde di campionamento (fumimetro e opacimetro) e della sonda di ritorno (dell'opacimetro), il tubo di scarico è stato intercettato su un lungo tratto rettilineo all'interno del vano passeggeri. Come si può notare dalla figura 5.6 le sonde sono poste ad una distanza tra loro di circa 25 cm, così come richiesto dalla ditta fornitrice degli strumenti.



Figura 5.6: Posizionamento delle sonde di prelievo dei gas di scarico per il bus di Napoli

La termocoppia di misura della temperatura dei gas di scarico (a monte del filtro) è stata posta subito a valle del collettore di scarico del motore (figura 5.7) mentre quella di misura della temperatura dei gas di scarico a valle del filtro è stata posta sul condotto di scarico, a monte delle tre sonde di figura 5.6.



Figura 5.7: posizionamento della termocoppia a monte dei dispositivi

DEFINIZIONE SPERIMENTAZIONE PRESSO AMAT DI PALERMO

La sperimentazione presso AMAT ha coinvolto due bus S9 e S11 e sul bus S9 è stato provato il dispositivo di cui si presenteranno i risultati.

Percorsi selezionati:

Una indicativa localizzazione dei percorsi selezionati è rappresentata in figura 5.8

- sperimentazione a velocità costante: tratto sulla variante a scorrimento veloce Palermo-Aeroporto Falcone-Borsellino (indicata nel cerchio rosso);
- sperimentazione nel traffico urbano della città di Palermo (cerchio blu): linea 102 circolare tra Piazza Giotto– Stazione – Piazza Giotto.



Figura 5.8: Localizzazione dei percorsi seguiti con AMAT di Palermo.

Gli autobus di AMAT sono stati caricati con sacchi riempiti di acqua di circa 15 kg ciascuno, per un carico totale di 1,8 t simulando un carico medio di circa 25 persone (figura 5.9).



Figura 5.9: bus zavorrato presso AMAT.

Installazione del dispositivo a Palermo

Il dispositivo che al momento delle prove aveva già accumulato 40.000 Km, era formato da un unico blocco e alloggiato in sostituzione del silenziatore situato in alto e in posizione laterale.

Per evitare problemi di ingombro, e garantire un opportuno tratto rettilineo a valle del dispositivo, si è sostituito al tubo di scarico originale un tubo di ferro zincato nel quale sono state inserite le sonde di prelievo del fumimetro, dell'opacimetro, la sonda di ritorno dell'opacimetro e la termocoppia per la misura della temperatura a valle del dispositivo.

I due led per il monitoraggio della contropressione non siamo stati in grado di portarli nel vano passeggeri per poterli visionare durante i percorsi su strada, ma abbiamo verificato che il sensore di contropressione non ha avuto i problemi del sensore installato sul bus S1 di Napoli.

DEFINIZIONE SPERIMENTAZIONE PRESSO SGM DI LECCE

La sperimentazione con SGM ha coinvolto tre bus e sul bus S29 è stato provato il dispositivo DPX che aveva accumulato, al momento delle prove circa 30.000 Km.

I tre bus sono stati zavorrati mediante barili riempiti di acqua per circa 1.2 t per simulare un carico medio di 16 passeggeri circa (figura 5.10).



Figura 5.10: Bus zavorrato presso SGM Lecce

Percorsi selezionati:

Una indicativa localizzazione dei percorsi selezionati è rappresentata in figura 5.11

- sperimentazione a velocità costante: tratto su strada provinciale Lecce- San Cataldo e ritorno (indicata nel cerchio rosso);
- sperimentazione nel traffico urbano della città di Lecce (cerchio blu): linea 25 circolare tra Zona 167– Stazione – Zona 167.



Figura 5.11: Localizzazione della sperimentazione presso SGM di Lecce.

Installazione del dispositivo DPX

Tale dispositivo formato da un unico blocco è andato a sostituire il silenziatore originale situato in alto sul tetto del bus, vedi figura 5.12. Per evitare problemi di ingombro e garantire un opportuno tratto rettilineo, a valle del dispositivo si è aggiunto all'uscita del condotto di scarico sia senza che con dispositivo un raccordo collegato a un tubo di ferro zincato nel quale sono state inserite le sonde di prelievo del fumimetro, dell'opacimetro e della termocoppia a valle del dispositivo.



Figura 5.12: Particolare delle sonde di prelievo dei gas di scarico con DPX a Lecce.

I led di controllo della contropressione sono stati portati nel vano passeggeri e sono stati monitorati durante le prove su strada. Durante il monitoraggio si è spesso acceso il led giallo ad indicare che si era raggiunto un valore di contropressione superiore ai 200 mbar per più di 30 secondi, ma il led rosso non si è mai visto acceso, quindi la rigenerazione del dispositivo avveniva regolarmente.

5.6 RISULTATI DELLE PROVE NEI TRATTI A VELOCITA' COSTANTE

Nelle 3 pagine successive sono riportati i grafici di alcune delle grandezze acquisite durante tutto il tratto a velocità costante con e senza dispositivo installato sui bus S1, S9 e S29. Sull'asse delle ascisse è indicato il numero dei secondi acquisiti e sull'asse delle ordinate vengono riportate l'opacità acquisita [%] e la velocità prelevata dal tachimetro [km/h]. In ogni diagramma è stato considerato tratto a velocità costante quello racchiuso tra i punti neri rappresentati nel diagramma. Infatti all'interno di tale intervallo la variazione della velocità è piccola. Le scale delle ordinate sono le stesse per la parte superiore ed inferiore dei diagrammi.

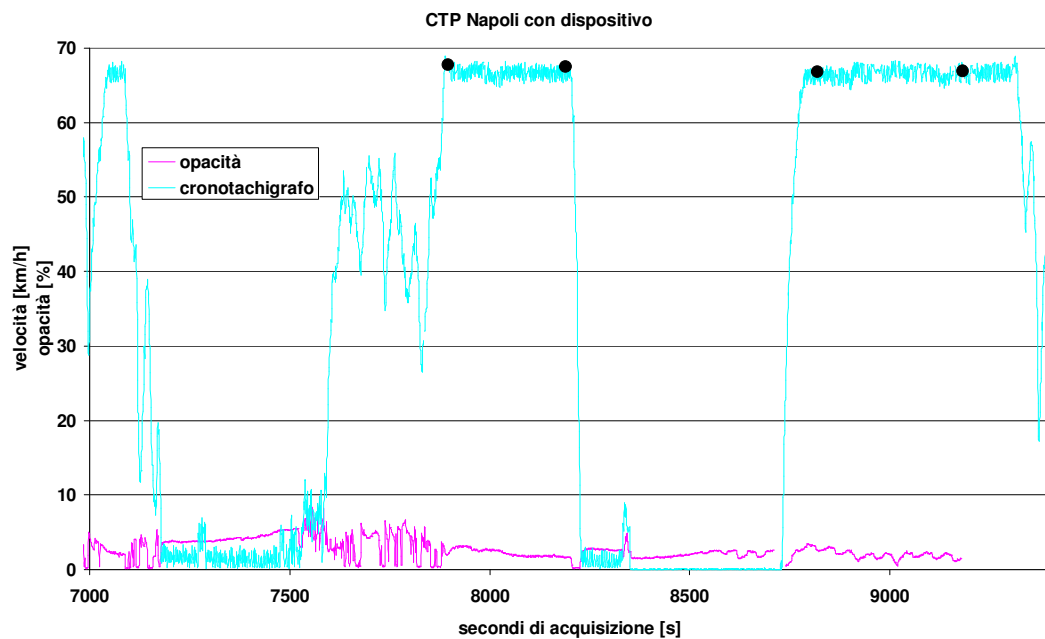


Figura 5.13: Andamento della velocità e dell'opacità puntuali acquisite durante il tratto a velocità costante con bus S1 di Napoli con il dispositivo.

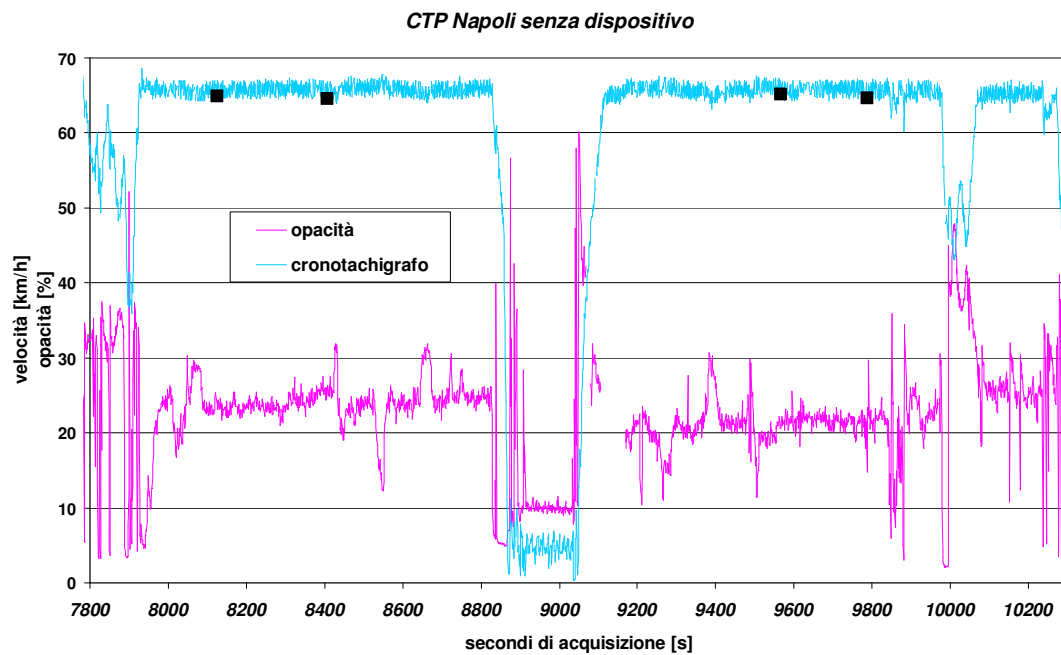


Figura 5.14: Andamento della velocità e dell'opacità puntuali acquisite durante il tratto a velocità costante sul bus S1 di Napoli senza il dispositivo.

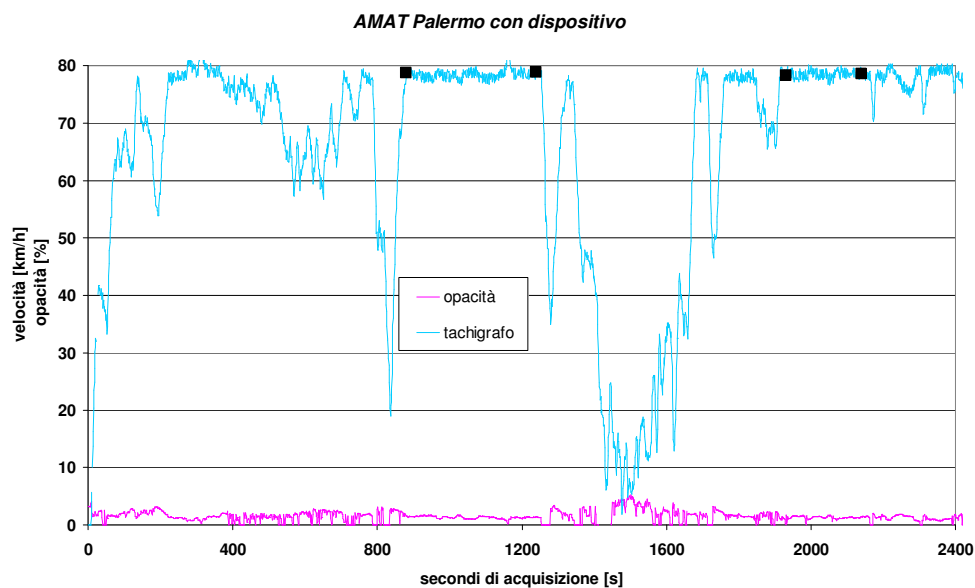


Figura 5.15: Andamento della velocità e dell'opacità puntuali acquisite durante il tratto a velocità costante sul bus S9 di Palermo con il dispositivo.

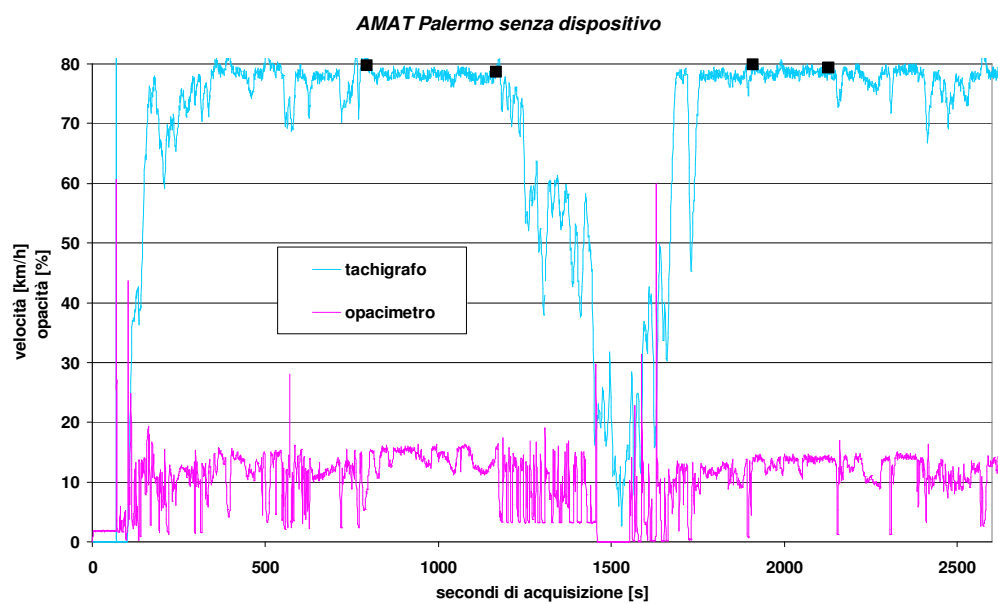


Figura 5. 16: Andamento della velocità e dell'opacità puntuali acquisite durante il tratto a velocità costante sul bus S9 di Palermo senza il dispositivo.

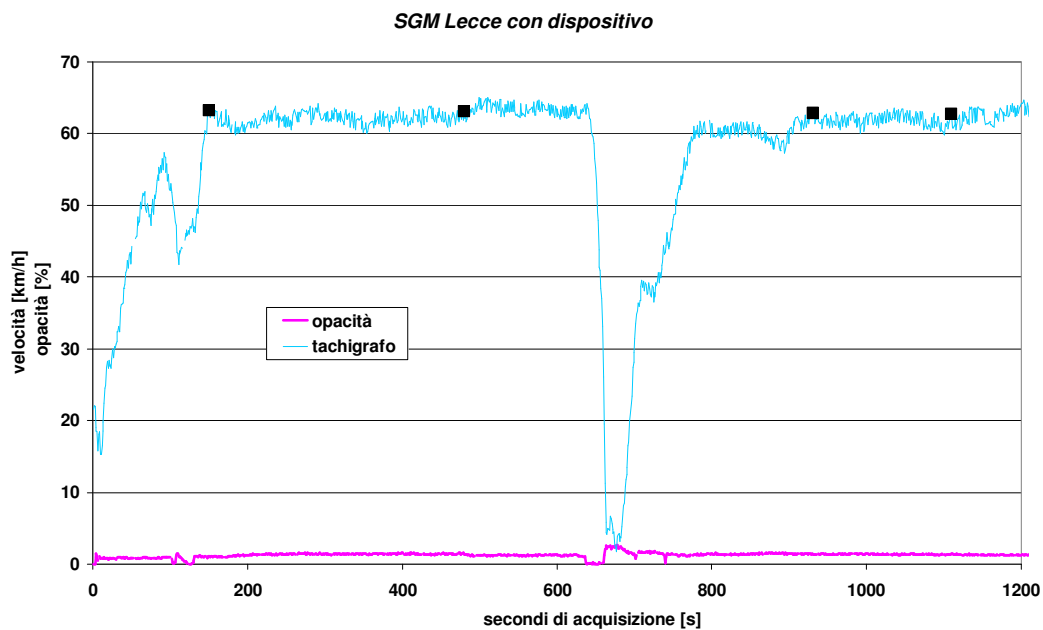


Figura 5.17: Andamento della velocità e dell'opacità puntuali acquisite durante il tratto a velocità costante sul bus S29 di Lecce con il dispositivo.

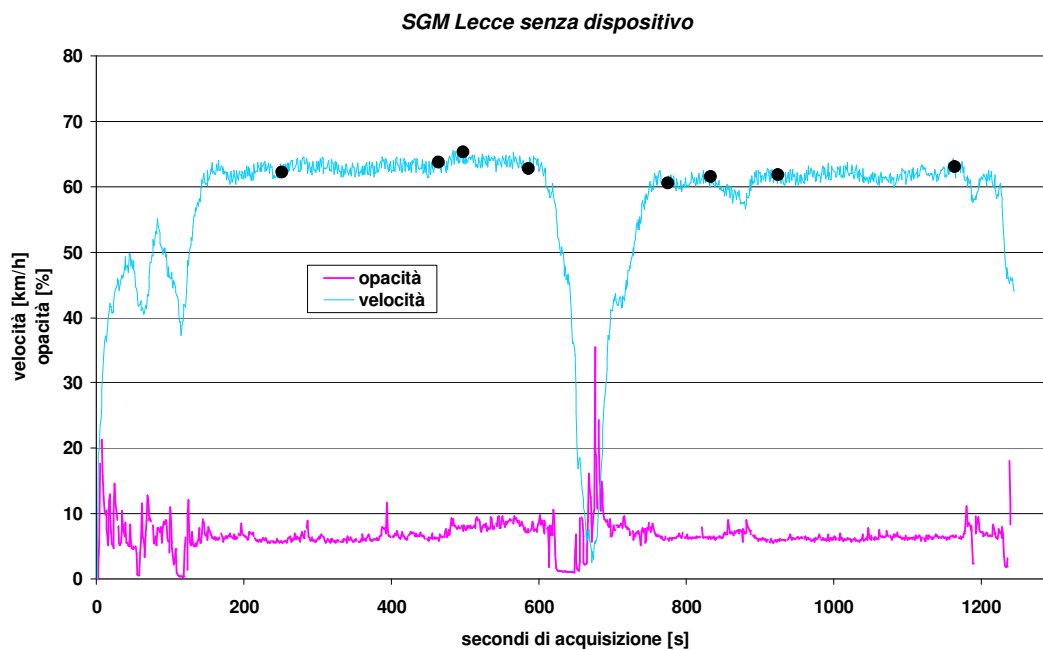


Figura 5.18: Andamento della velocità e dell'opacità puntuali acquisite durante il tratto a velocità costante sul bus S29 di Lecce senza il dispositivo.

Nelle figure delle tre pagine successive sono rappresentati i valori dell'opacità e della fumosità con e senza il dispositivo sui bus S1, S9 e S29. Ogni singolo punto di opacità nel diagramma rappresenta la media dei valori di opacità acquisiti in 30 secondi. Si è resa necessaria questa operazione di mediare ogni 30 secondi i valori di opacità per poter relazionare il valore di opacità al valore di fumosità, che viene letto e acquisito in tale intervallo di tempo.

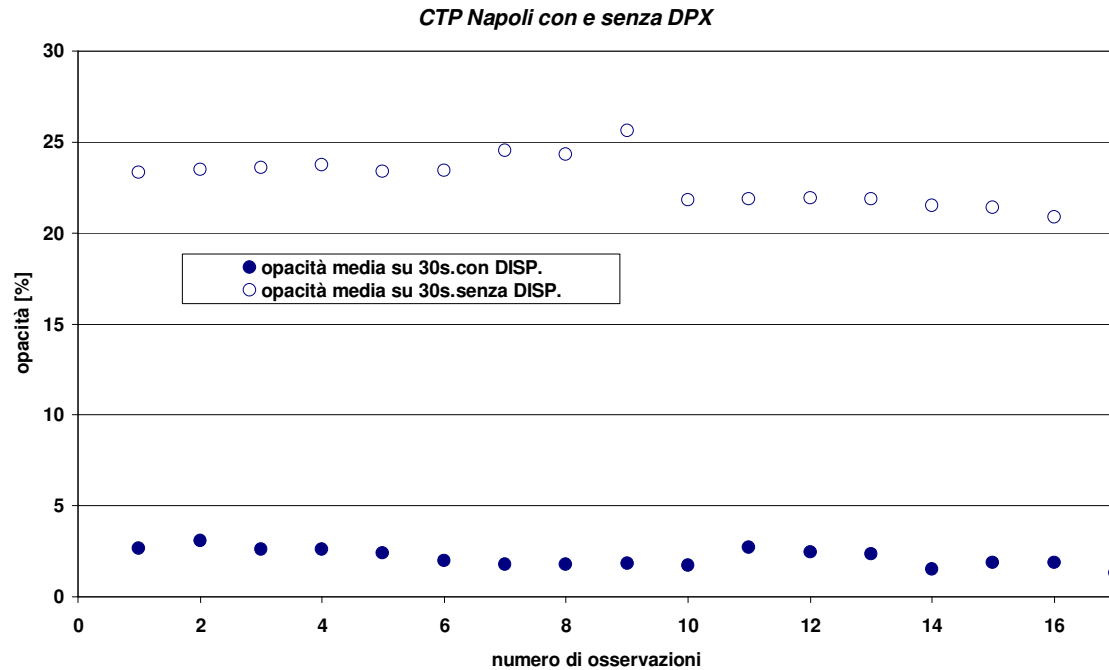


Figura 5.19: Valori di opacità medi con e senza dispositivo sul bus S1.

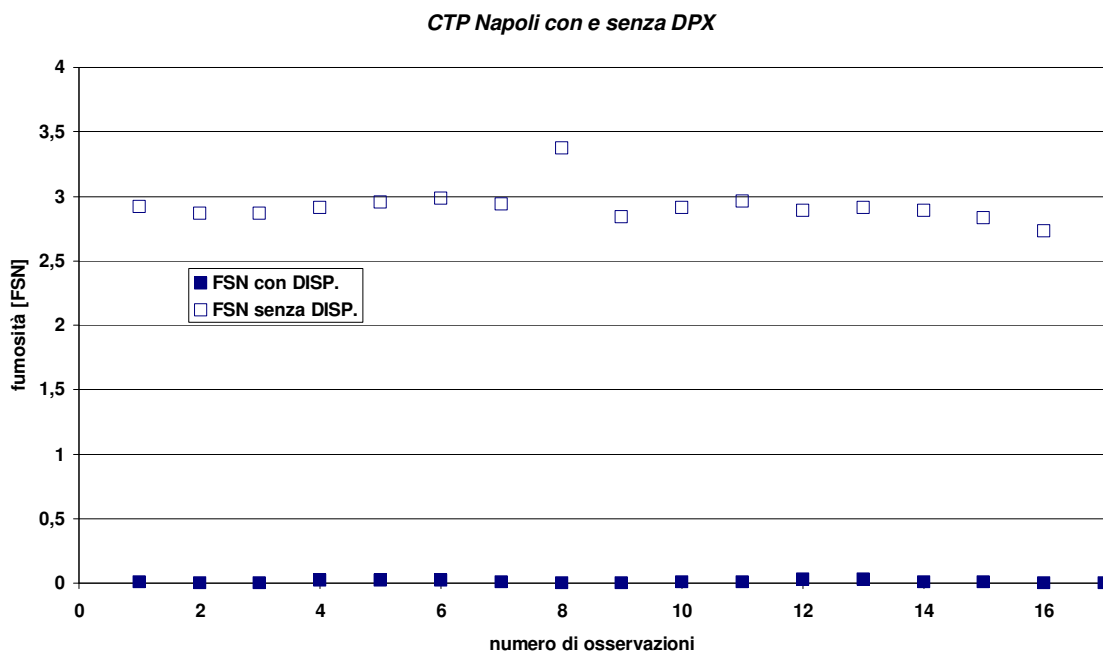


Figura 5.20: Valori di fumosità con e senza dispositivo sul bus S1.

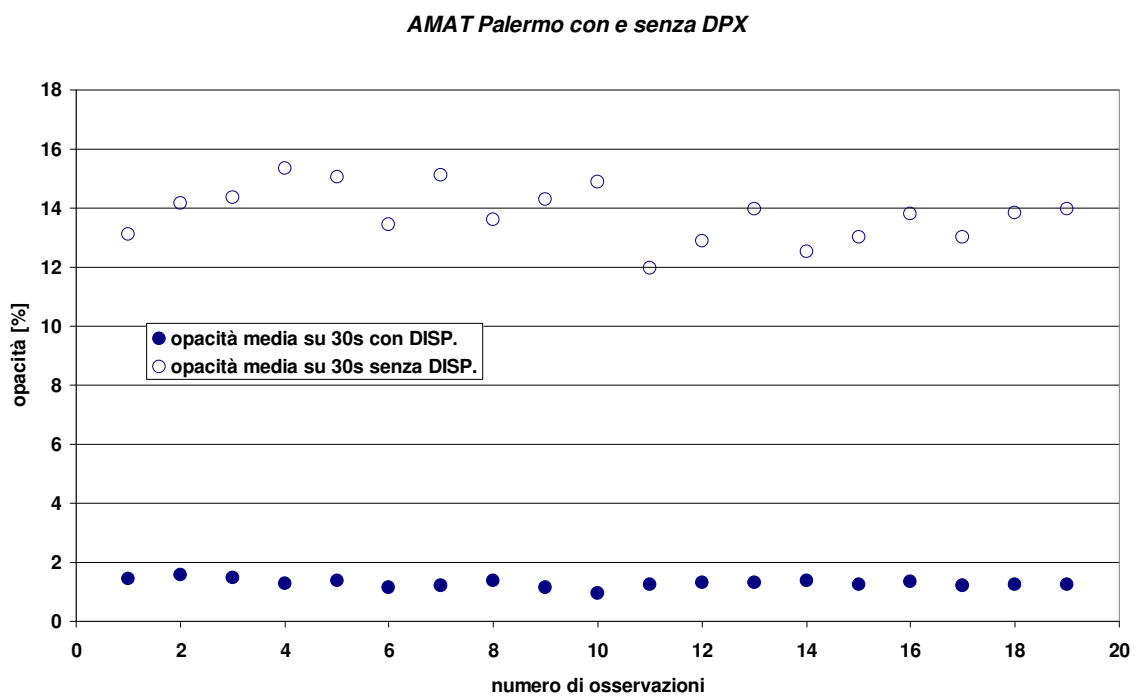


Figura 5.21: Valori di opacità medi con e senza dispositivo sul bus S9.

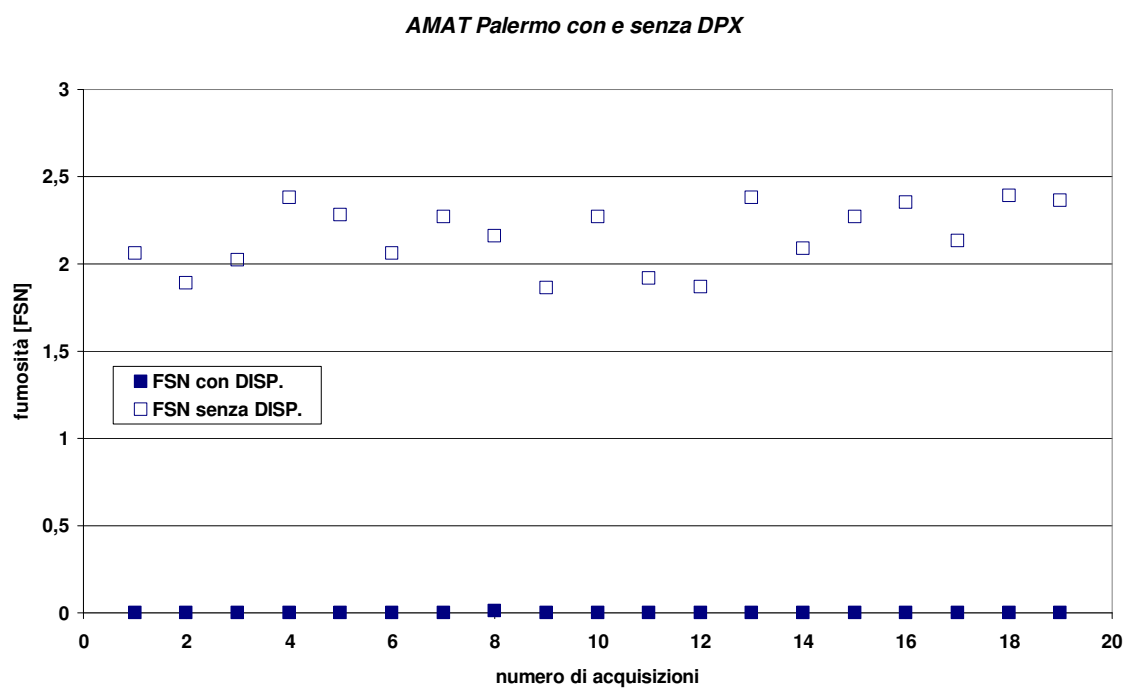


Figura 5.22: Valori di fumosità con e senza dispositivo sul bus S9.

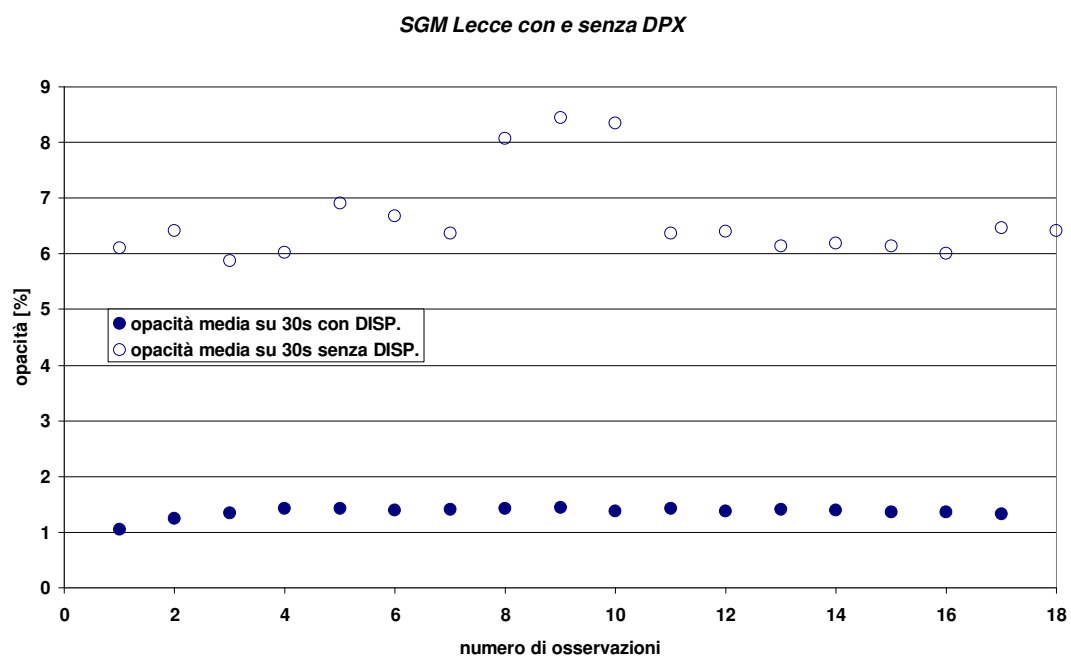


Figura 5.23: Valori di opacità medi con e senza dispositivo sul bus S29.

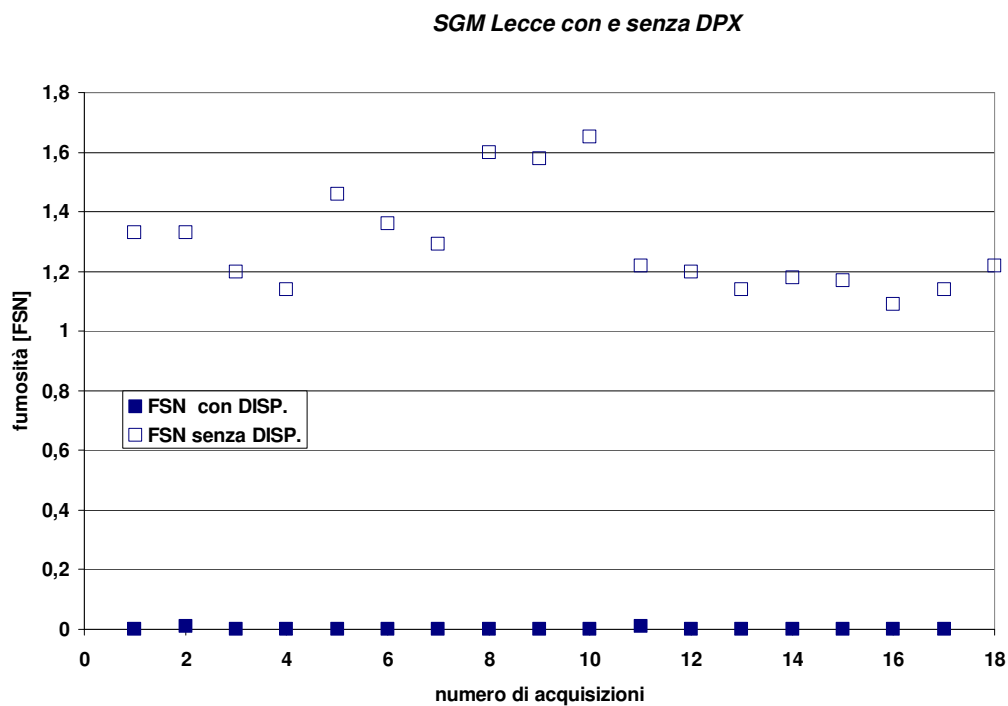


Figura 5.24: Valori di fumosità con e senza dispositivo sul bus S29.

Nelle pagine successive sono rappresentati, tramite istogrammi normalizzati, i valori medi di opacità e di fumosità, con le deviazioni standard delle misure, con e senza il dispositivo per i bus S1, S9 e S29. Inoltre in ogni tabella viene indicato il valore complessivo dei chilometri percorsi nel tratto a velocità costante (chilometri del solo tratto utilizzato per la valutazione dell'opacità e della fumosità), il valore medio di velocità avuta su quel tratto e la sua deviazione standard.

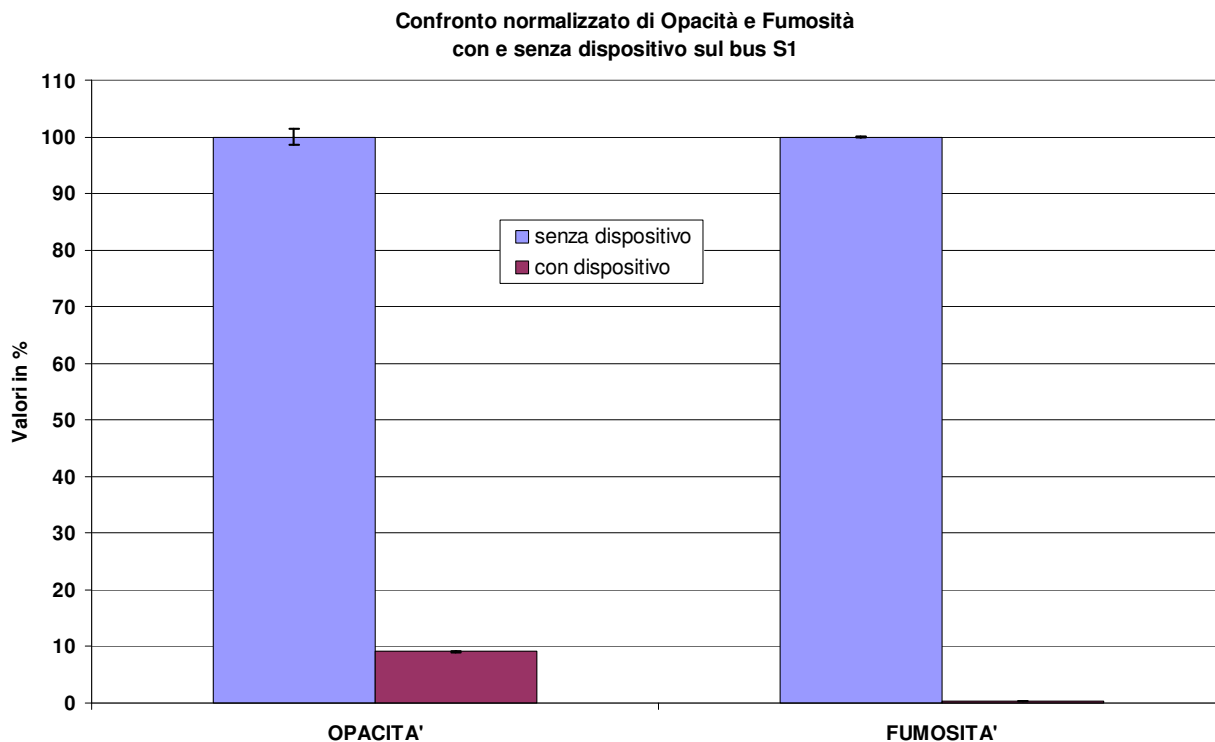


Figura 5.25: Istogramma normalizzato dei valori medi di fumosità e opacità con e senza dispositivo sul bus S1

S1 Napoli	SENZA DISPOSITIVO		CON DISPOSITIVO	
	Media	Dev. Std.	Media	Dev. Std.
Velocità [km/h]	65.8	0.12	66.6	0.32
Opacità [%]	22.9	1.34	2.08	0.46
Fumosità [FSN]	2.92	0.13	0.01	0.01

Tabella 5.7: confronto risultati ottenuti sul bus S1

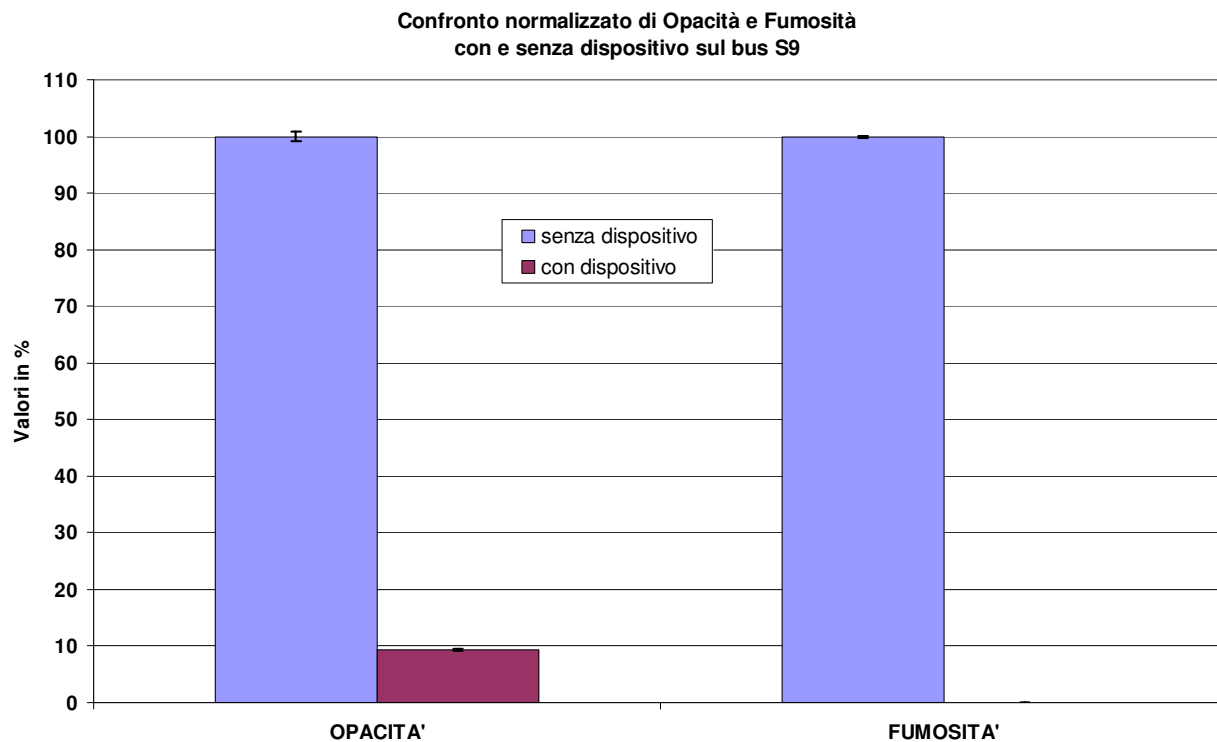


Figura 5.26: Istogramma normalizzato dei valori medi di fumosità e opacità con e senza dispositivo sul bus S9

S9 Palermo	SENZA DISPOSITIVO		CON DISPOSITIVO	
	Media	Dev. Std.	Media	Dev. Std.
Velocità [km/h]	78.3	0.42	78.5	0.43
Opacità [%]	13.81	0.92	1.29	0.14
Fumosità [FSN]	2.16	0.19	0.00	0.00

Tabella 5.8: Confronto risultati ottenuti sul bus S9.

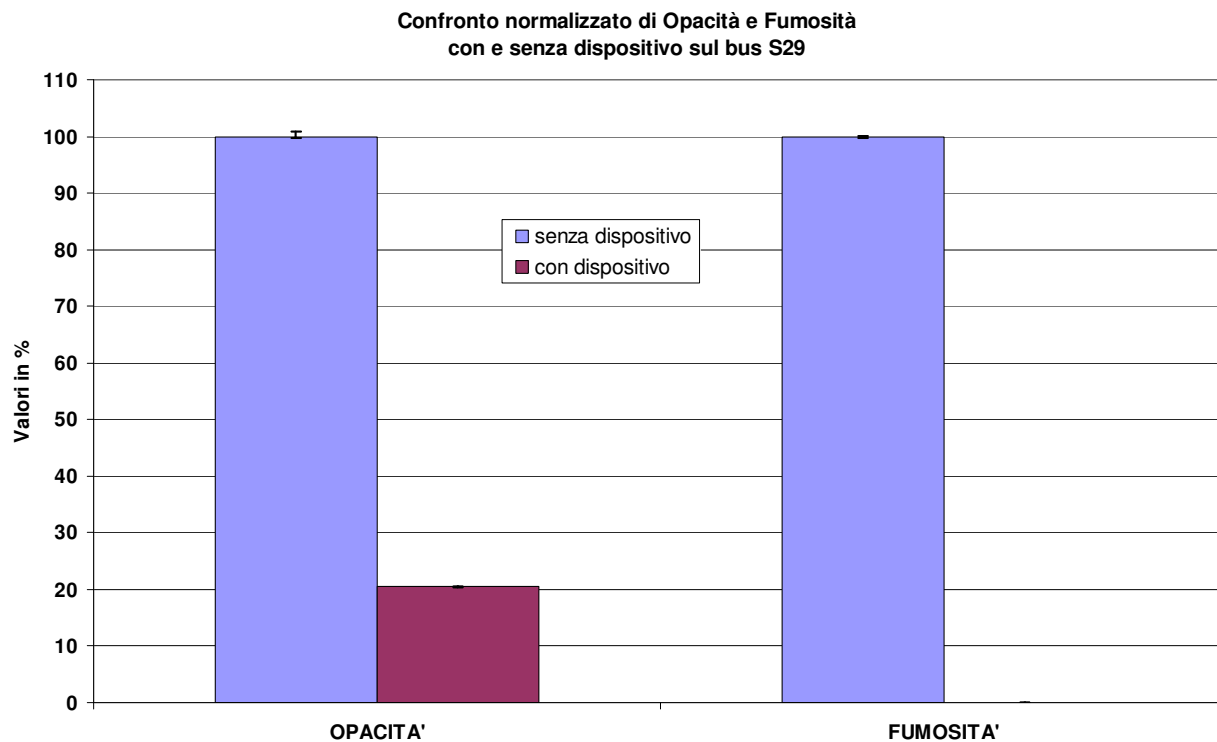


Figura 5.27: Istogramma normalizzato dei valori medi di fumosità e opacità con e senza dispositivo sul bus S29.

S29 Lecce	SENZA DPX		CON DPX	
	Media	Dev. Std.	Media	Dev. Std.
Velocità [km/h]	62.5	1.05	62.0	0.46
Opacità [%]	6.64	0.83	1.36	0.09
Fumosità [FSN]	1.3	0.18	0	0

Tabella 5.9: Confronto risultati ottenuti sul bus S29.

5.7 ANALISI DEI TRATTI URBANI CON E SENZA DISPOSITIVO

Come abbiamo precedentemente detto, nell'analisi del comportamento del dispositivo nei confronti dell'opacità, si è andati ad analizzare per ogni città la velocità acquisita alla ricerca di una manovra simile fatta dall'autista con e senza dispositivo. Ad ogni profilo di velocità trovato, è stato associato il profilo di opacità e si è analizzato il valori di picco di opacità.

VALUTAZIONE PER CTP

Nella figura 5.28 il diagramma di velocità e di opacità corrispondente selezionato per CTP, da un'analisi di tutti gli stop and go del bus nei suoi tre percorsi urbani (Sferisterio, Piazza Garibaldi – Piazza Garibaldi, Mostra) senza dispositivo.

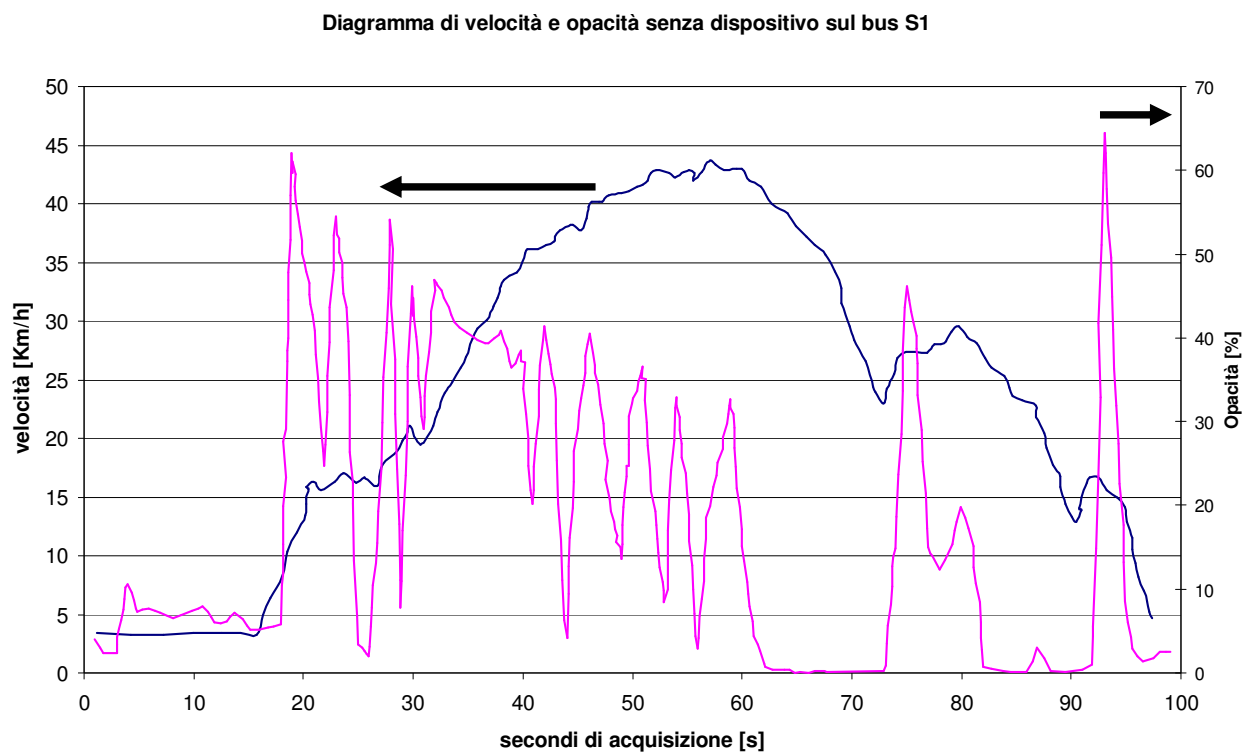


Figura 5.28: Diagramma di velocità e opacità selezionato senza dispositivo sul bus S1.

Nella figura 5.29 il diagramma di velocità e opacità quando sul bus S1 era installato il dispositivo.

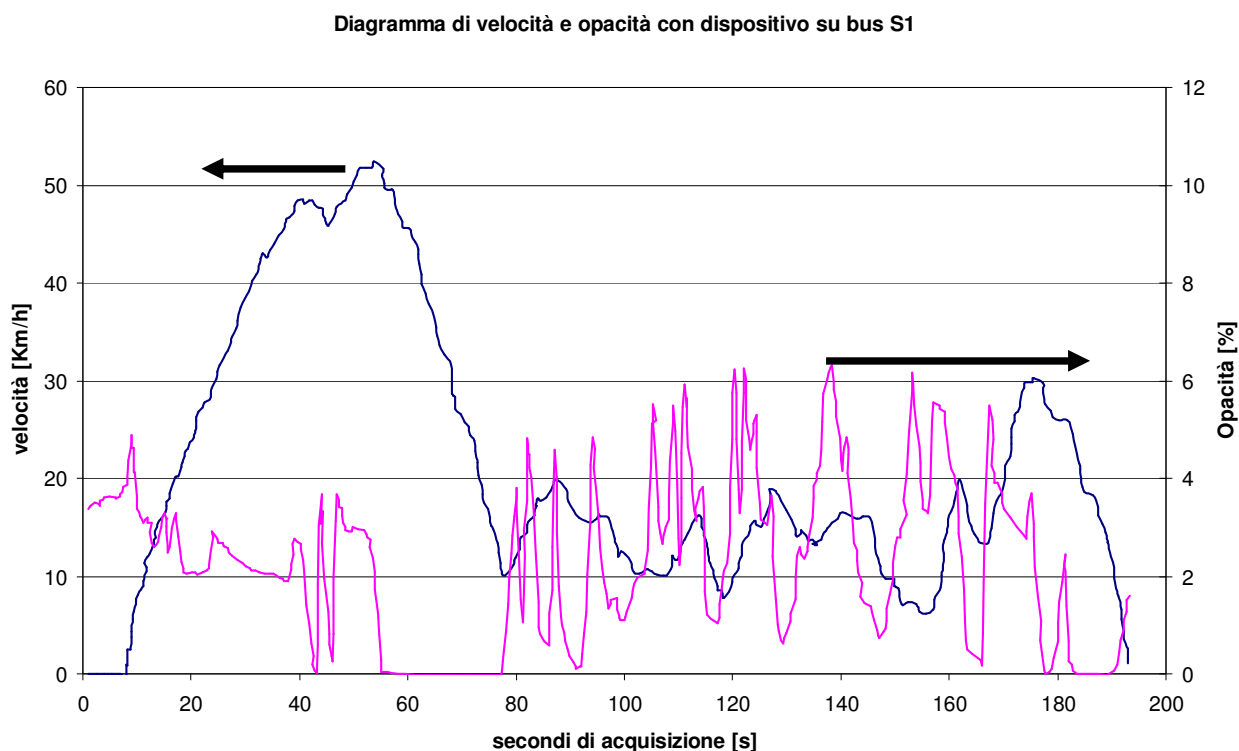


Figura 5.29: Diagramma di velocità e opacità selezionato con il dispositivo sul bus S1.

Dai diagrammi si nota che il dispositivo anche su una manovra di tipo urbana apporta una riduzione sui picchi di opacità di un ordine di grandezza, infatti si passa a picchi di 60% a picchi del 6%.

VALUTAZIONE PER AMAT

Il tratto analizzato per AMAT per la ricerca della manovra simile con e senza il dispositivo, è il percorso urbano fatto durante linea 102 circolare tra Piazza Giotto– Stazione – Piazza Giotto.

Nelle figure successive il diagramma di velocità di opacità corrispondente senza il dispositivo e con il dispositivo.

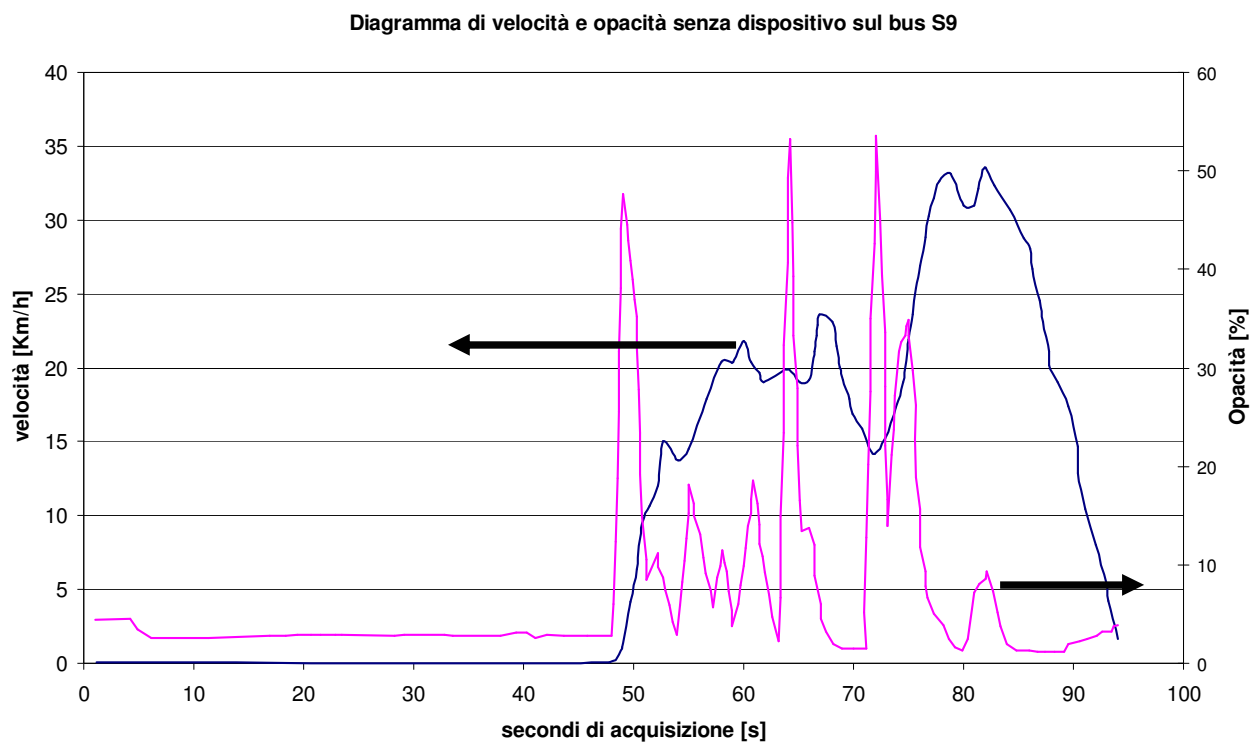


Figura 5.30: Diagramma di velocità e opacità selezionato senza dispositivo sul bus S9.

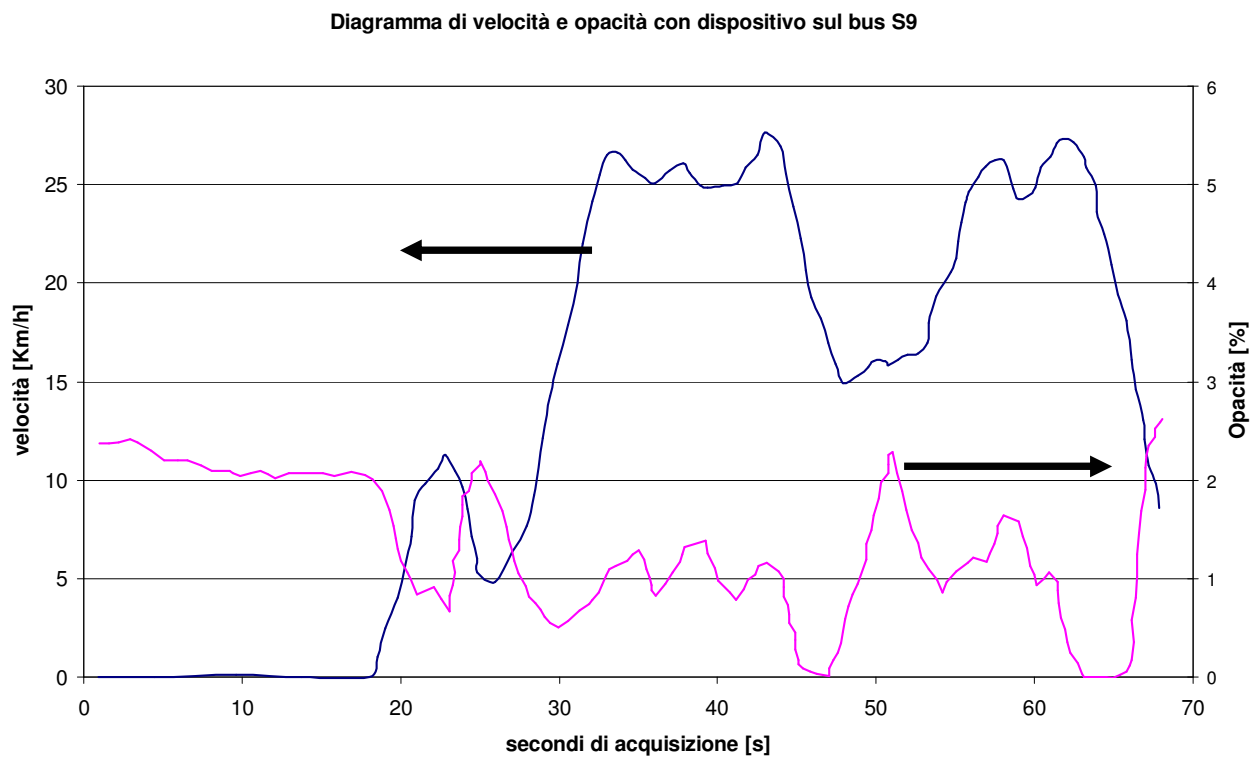


Figura 5.31: Diagramma di velocità e opacità selezionato con il dispositivo S9.

Come si può notare anche per AMAT si sono avuti picchi di oltre il 50% quando non era installato il dispositivo e picchi di oltre il 2% quando invece era installato il dispositivo.

VALUTAZIONE PER SGM

Il tratto analizzato per SGM per la ricerca della manovra simile con e senza il dispositivo, è il percorso urbano della linea 25 circolare tra Zona 167– Stazione – Zona 167.

Nelle figure successive il diagramma della velocità e dell'opacità corrispondente senza e con il dispositivo.

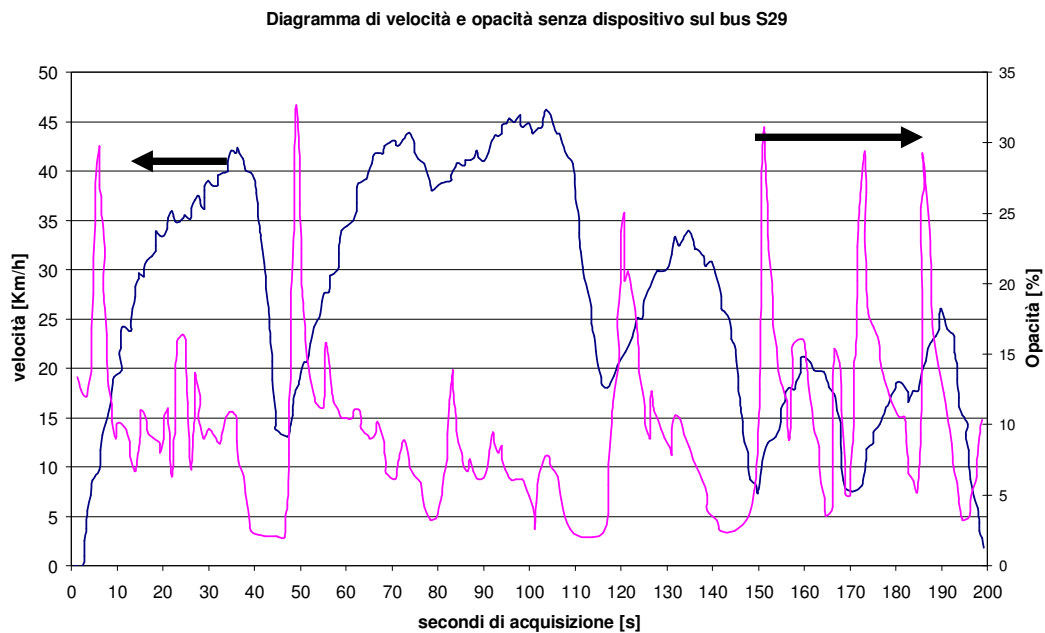


Figura 5.32: Diagramma di velocità e opacità selezionato senza dispositivo sul bus S29.

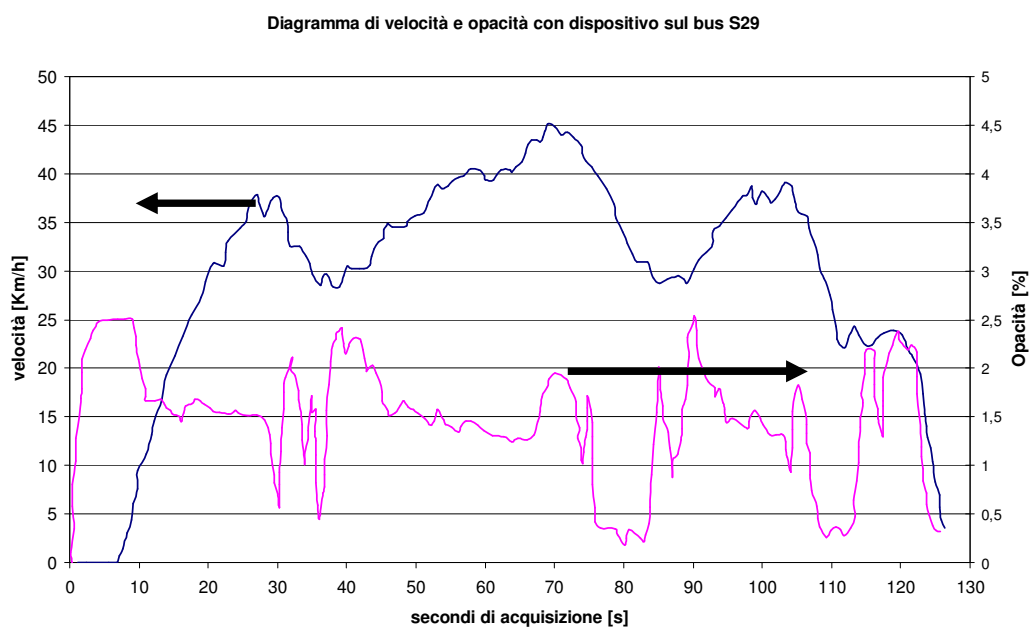


Figura 5.33: Diagramma di velocità e opacità selezionato con dispositivo sul bus S29.

Come si può notare dai diagrammi, anche per il bus di SGM si è passato da valori di opacità di oltre il 30% a valori di 3% quando era installato il dispositivo.

BIBLIOGRAFIA:

Mridul Gautam et al. "Measurement of in Use, on Board Emissions from Heavy-Duty Diesel Vehicles: Mobile Emissions Measurement System" SAE 2001-01-3643

A.C. Alkidas "Relationships Between Smoke Measurements and Particulate Measurements" SAE 840412

George G. Munean "A Theoretical Model For The Correlation Of Smoke Number To Dry Particulate Concentration in Diesel Exhaust" SAE 1999-01-0515

DieselNet Technical Report: Andreas Mayer "Selection Criteria For Diesel Particulate Trap Systems: VERT Experience" Dicembre 1998

6) CONCLUSIONI

Dai risultati ottenuti si può concludere che il filtro catalizzato provato sul motore al banco ha consentito una riduzione del particolato di oltre l'80% e di CO e HC di oltre il 90%. Durante le prove al banco, non si sono riscontrati apprezzabili variazioni del consumo di combustibile.

Per ciò che riguarda l'effetto dei dispositivi sulle emissioni inquinanti riscontrato nelle prove su strada, i dispositivi hanno mostrato un'alta efficienza sia nei tratti a velocità costante che nei percorsi urbani selezionati. Infatti nelle prove su strada, c'è stata una riduzione dell'opacità di oltre l'80% e della fumosità di oltre il 90%.

Questo effetto di riduzione lo si è avuto anche nelle prove fatte sui percorsi urbani in una manovra simile con e senza dispositivo dove si è avuto con l'opacimetro una riduzione di un ordine di grandezza del valore di opacità senza il dispositivo.

La valutazione dei consumi dai dati elaborati dei questionari di una flotta di bus che svolge normale esercizio di linea, senza alcun dispositivo installato, ha evidenziato valori di consumo intorno ai 2 km/l, valori in linea con i dati trovati in letteratura.

La valutazione dei consumi attraverso un misuratore installato a bordo, ha evidenziato un aumento tra 1-5%, quando sul bus era installato il dispositivo.

Il lavoro continuerà verificando l'efficacia dei dispositivi all'accumularsi dei chilometri, così come stanno facendo già da alcuni anni ricercatori del VERT (Verminderung der Emissionen von Realmaschinen im Tunnelbau) e dell'agenzia ARB americana (Air Resources Board) sui dispositivi aftermarket, mediante cicli di invecchiamento realizzati al banco o su strada.